



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JYRI ERKKILÄ

RADAN ALUSRAKENTTEEN KANTAVUUS- JA TIIVIYSSELVITYS

Diplomityö

Tarkastajat: prof. Kolisoja Pauli
ins. Hakala Seppo

Tarkastajat ja aihe hyväksytty Rakennetun ympäristön tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 5. touko-
kuuta 2010

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

ERKKILÄ, JYRI: Radan alusrakenteen kantavuus- ja tiiviysselvitys

Diplomityö, 107 sivua, 7 liitesivua

Syyskuu 2010

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastajat: Professori Pauli Kolisoja, Insinööri Seppo Hakala

Avainsanat: Rautatie, ratarakenne, alusrakenne, eristyskerros, välikerros, kelpoisuuskirja, kantavuus, tiiviyys

Radan alusrakenteen pääasiallisena tehtävänä on jakaa kuormia alapuoliselle maa- tai kalliopohjalle sekä yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa estää tai pienentää alla olevien maakerrosten routimisesta aiheutuvat haitalliset muodonmuutokset radassa. Tiiviyys on yksi tärkeimmistä karkearakeisista materiaaleista tehdyn rakenteen pitkäaikaiseen muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä ja selkeä mittari arvioitaessa kuormituksesta rakenteeseen syntyviä painumia. Muutamassa viime vuosina valmistuneessa projektissa on alusrakenteen tiiviyksissä osoittautunut olevan ongelmia. Nykyisten vaatimusten mukaisten alusrakennemateriaalien rakeisuuksien ja valmiilta alusrakenteilta vaadittavien kantavuuksien ohjearvojen vaikutusta näihin ongelmiin on syytä tutkia.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää ratarakenteissa käytettävien materiaalien rakeisuuksien ja tiivistysmenetelmien vaikutusta tarkkailumittauksilla todennettuihin radan alusrakenteen tiiviyksiin, sen päältä saataviin kantavuuksiin ja rakennekerrosten tiivistettävyyteen. Edellä mainittuja asioita tutkittiin toteutuneiden ratahankkeiden kelpoisuuskirjoihin dokumentoiduista aineistoista.

Tutkimuskohteiksi valikoitiin kahdeksan eri hanketta, joista kahdessa oli kolme erillistä alusrakenteen rakentamisen sisältävää urakkaa. Kohteissa oli sekä luonnonmateriaaleista että kalliomurskeista rakennettuja alusrakenteita. Yhdestä urakasta oli käytettävissä rakenteen tiivistämisessä käytetyn itsemittaavan jyrän tiivistystulosaineistoa, jota verrattiin perinteisemmällä tiiviydenmittausmenetelmällä saatuihin arvoihin.

Tutkimustulosten perusteella nykyisten vaatimusten mukaisilla luonnonmateriaaleilla rakennetuissa alusrakenteissa parhaat tiiviyys- ja kantavuusarvot saavutettiin materiaaleilla, joiden rakeisuudet olivat rakeisuusohjealueiden rajakäyrien suuntaisia. Materiaaleilla, jotka sinänsä täyttivät laatuvaatimukset, mutta sisälsivät epätavallisen paljon hiekkaa tai olivat tasarakeisia, havaittiin tiivistävyysongelmia. Kalliomurskemateriaaleilla ongelmana on usein ollut lajittuminen. Tutkimuksessa mukana olleista kohteista, joissa materiaalin rakeisuusnäytteitä oli otettu sekä murskauksen yhteydessä että valmiista rakenteesta, oli havaittavissa materiaalin hienoainespitoisuuden vähenemistä valmistuksen jälkeisen ja valmiissa rakenteessa olevan materiaalin välillä. Tämä aiheuttaa materiaalin tasarakeistumista ja heikentää materiaalin tiivistymistä. Uusissa kalliomurskemateriaaleille asetetuissa teknisissä vaatimuksissa on pienimpien raekokojen ($< 2 \text{ mm}$) osuutta pyritty lisäämään ohjerakeisuuskäyriä muuttamalla.

Tutkimustuloksista oli havaittavissa oikeanlaisten työmenetelmien tärkeys rakenteiden laatuvaatimusten täyttymiseen. Oikeanlaiset työmenetelmät ja tiivistyskalusto tulee valita käytettävän materiaalin mukaan. Lisäksi kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus tulee suhteuttaa tiivistyskalustoon. Kerrospaksuuksien osalta tutkimuksessa havaittiin, että yli 500 mm kerrospaksuudet eivät tiivisty riittävästi koko paksuudeltaan kalustosta riippumatta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Department of Civil Engineering

ERKKILÄ, JYRI: Bearing capacity and density research of track substructure

Master of Science Thesis, 107 pages, 7 Appendix pages

September 2010

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja, Engineer Seppo Hakala

Keywords: track structure, substructure, bearing capacity, density, compaction

The main function of track substructure is to reduce pressures from the sleepers bearing area to acceptable stress levels for the underlying structures and ground or rock subgrade. Its' other function is to alleviate the injurious deformations in track caused by subgrade frost. Density of structures is one of the most important factors when appraising long-term deformations of coarse-grained materials. Density of structure is good indicator also when appraising the settlements of structure caused by loads of vehicle. Requirements for gradations of substructure materials and for bearing capacity of completed substructure achievements to density problems of substructure need further investigation.

The purpose of this study is to research the influence of gradation of substructure materials and compacting methods of track substructure on density and bearing capacity results measured from substructure surface and on compaction properties of structure layers. These things are investigated based on the information compiled from validity documents of finished track projects.

Information was collected from eight track projects, two of which include several track substructure contracts. The substructures in these projects have been constructed both by using natural materials and crushed rock. One of the mentioned contract's validity documents includes also compaction information of self measuring vibrating roller. These results were compared with density results got by traditional compaction test methods.

According to the research results, the best density and bearing capacity results for substructures, which are constructed by using natural materials, accomplished by materials which gradation curves were parallel with border gradation curves of requirements of these materials. Some problems were also found in compressing of structure layers when used materials, which gradation curves lie between the requirements border gradation curves and fill the quality demands in any case but have unusually high sand content or were homogenous. Assort of grains have been a problem when using crushed rock materials in substructure. The research established that there occurs some degradation between materials checked after manufacturing and after constructing. This degradation is mainly a result of migration of fine particles. If there are less fine particles, material change more homogenous and weaken compaction characteristics. New quality requirements allow materials with more fine particles.

The research results indicate the importance of right construction methods so that the demands of quality are able to be accomplished. Right construction methods and compaction machines should fit to materials which are used. Thickness of construct layer must be chosen in proportion to compaction machines. According to the research results, thickness of at one time construct layers can't be more than 500 mm, despite the roller weight, so that the structured layer is possible to compress through its entire depth.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Oy VR-Rata Ab rautatiesuunnittelun georyhmässä. Työn on tilannut entinen Ratahallintokeskus nykyinen Liikennevirasto. Työn ohjausryhmään kuuluivat DI Matti Levomäki Liikenneviraston rautatieosastolta, professori Pauli Kolisoja Tampereen teknilliseltä yliopistolta, ins. Seppo Hakala, DI Heikki Komulainen ja DI Kimmo Laatunen Oy VR-Rata Ab:sta. Suuret kiitokset koko ohjausryhmälle antamastanne avusta ja asiantuntevasta ohjauksesta työn valmiiksi saattamiseksi.

Haluan kiittää myös tutkimuskohteiden työmaahenkilöitä, joilta sain tutkimusaineistoa ja ensiarvoisen tärkeitä tietoja kohteiden työmenetelmistä ja -käytännöistä sekä työkavereita rauhallisesta työympäristöstä ja rennosta ilmapiiristä.

Lämpimät kiitokset myös perheelleni ja muille läheisille, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua tämän työn valmistumisessa ja koko opintojeni aikana.

Tampereella 30.8.2010

Jyri Erkkilä

SISÄLLYS

1.	Johdanto.....	1
2.	Radan rakenne ja yleiset laatuvaatimukset.....	3
2.1.	Radan rakenne	3
2.1.1.	Normaalipoikkileikkaus ja sen määräytyminen.....	3
2.1.2.	Rakennekerrokset ja niiden tehtävät	6
2.2.	Ratarakenteissa käytettyjen materiaalien laatuvaatimukset.....	8
2.2.1.	Pengermateriaalit	10
2.2.2.	Alusrakennemateriaalit.....	12
2.3.	Ratarakenteen laatuvaatimukset Suomessa	16
2.3.1.	Mittatarkkuusvaatimukset	17
2.3.2.	Tiiviys- ja kantavuusvaatimukset	19
2.4.	Radan alusrakenteiden vaatimuksia naapurimaissa	23
3.	Tiivistyskalustot ja -menetelmät	26
3.1.	Tiivistyskalustot	26
3.1.1.	Staattinen tiivistyskalusto.....	27
3.1.2.	Dynaaminen tiivistyskalusto.....	27
3.2.	Tiivistysmenetelmät	31
4.	Tiiviiden laadunvarmistuskalustot ja -menetelmät	33
4.1.	Suorat tiiviidenmittausmenetelmät.....	33
4.1.1.	Volymetrit.....	33
4.1.2.	Säteilymittauslaitteet	34
4.2.	Epäsuorat tiiviidenmittausmenetelmät.....	37
4.2.1.	Levykuormituskoe	37
4.2.2.	Pudotuspainolaite	37
4.2.3.	Itsemittaavat jyrät.....	38
4.2.4.	Tiivistystarkkailu työtapamenetelmällä.....	41
5.	Tutkimuskohteet	42
5.1.	Tutkimusmenetelmän kuvaus	42
5.2.	Oriselän oikaisu.....	43
5.2.1.	Yleistä.....	43
5.2.2.	Pohjaolosuhteet	44
5.2.3.	Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	44
5.3.	Kiimasuon oikaisu	47
5.3.1.	Yleistä.....	47
5.3.2.	Pohjaolosuhteet	48
5.3.3.	Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	49
5.4.	Kaitjärven liikennepaikka	51
5.4.1.	Yleistä.....	51
5.4.2.	Pohjaolosuhteet	52
5.4.3.	Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	52

5.5. Muuramen liikennepaikka	57
5.5.1. Yleistä.....	57
5.5.2. Pohjaolosuhteet	58
5.5.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	58
5.6. Kouvolan liikennepaikka	59
5.6.1. Yleistä.....	59
5.6.2. Pohjaolosuhteet	60
5.6.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	60
5.7. Oikorata Kerava-Lahti.....	61
5.7.1. Yleistä.....	61
5.7.2. Pohjaolosuhteet	62
5.7.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	64
5.8. Vuosaaren rata.....	72
5.8.1. Yleistä.....	72
5.8.2. Pohjaolosuhteet	74
5.8.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	74
5.9. Ykspihlajan liikennepaikka.....	81
5.9.1. Yleistä.....	81
5.9.2. Pohjaolosuhteet	82
5.9.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot	82
5.10. Kohteissa ilmenneitä ongelmia.....	83
6. Tulosten käsittely	86
6.1. Tiiviys	86
6.2. Kantavuus	87
6.3. Rakeisuusjakautuma	90
6.4. Vesipitoisuus	93
6.5. Itsemittaava jyrä	94
6.6. Työmenetelmät.....	96
6.7. Huomioita tutkimusmenetelmästä.....	97
6.8. Tulosten vertailu	98
7. Päätelmät ja jatkotutkimussuosituksset	101
Lähteet.....	104
Liite 1: Itsemittaavan jyrän tiivistystuloksen tuloste-esimerkkejä	108
Liite 2: Volymetrikokeen suoritus.....	109
Liite 3: Koetiivistyksen toteutus suunnitelman periaate	111
Liite 4: Eurokoodien mukaisen maalajiluokituksen määrittäminen rakeisuuteen perustuen.	114

TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

Alusrakenne	Radan alusrakenne koostuu väli-, eristys- ja suodatinkerroksesta sekä mahdollisesta routaeristeestä
E-moduuli	Muodonmuutosmoduuli, jolla kuvataan rakenteen jäykkyyttä
Eurokoodi	Euroopan yhteinen kantavien rakenteiden suunnittelustandardi
InfraRYL	Infrarakenteiden yleiset laatuvaatimukset on rakennusallalla yleisesti hyväksytyn hyvän rakennustavan kuvaus. Määrittää rakenteen ja sen osien toimivuusvaatimukset elinkaaren aikana ja asettaa tekniset vaatimukset rakenteelle sen valmistumishetkellä
Kalliomurske	Kalliosta louhittua ja murskaamalla valmistettua kiviainesta
Kantavuus	Rakenteen pinnalta mitattava kokonaisjäykkyys
Kelpoisuuskirja	Urakoitsijan työn aikana kokoama asiakirja, jossa ovat kohteen kaikki laatutositteet ja toteutumapiirustukset. Kelpoisuuskirja luovutetaan rakennuttajalle työn valmistuttua.
Korkeusviiva (Kv)	Tarkoitetaan viivaa, joka määrittelee raiteen korkeuden aluslevyn tai välilevy alapinnan tasossa kiskon kulkureunan kohdalla
Käyttöikävaatimus	Ajanjakso joka rakenteen tulee kestää täyttäen sille asetetut laadulliset ja toiminnalliset vaatimukset
Leikkauspohja	Leikatun pohjamaan yläpinta
Luonnonmateriaali	Maa-ainesmateriaali jota esiintyy luonnossa samassa olo- muodossa kuin sitä käytetään rakentamisessa
Maarakenne	Tiivistetty maa- tai maarakennekerros, vaihdettu ja tiivistetty maarakennekerros (massanvaihto) tai vahvistettu maa- tai maarakennekerros (pohjanvahvistus)
Optimivesipitoisuus	Maalajille ominainen vesipitoisuus, jolla saavutetaan maa- aineksen maksimikuivatiheys
Pengerleveys	Radan alusrakenteen, normaalisti välikerroksen, yläpinnan leveys
Pengerpohja	Pengertäytteen alla olevan pohjamaan pinta
Pohjamaa (perusmaa)	Ratapenkereen alla oleva maa
Päällysrakenne	Radan rakenneosaa, johon kuuluu tukikerros ja raide
Raide	Koostuu ratapölkyistä, rataakiskoista, rataakiskojen kiinnitys- ja jatkososista sekä vaihteista ynnä muista raiteen erikoisrakenteista
Raideväli	Vierekkäisten raiteiden keskilinjoiden välinen lyhin etäisyys
Rakeisuuskäyrä	Maa-aineksen seulomalla tai areometrikokeella selvitetty raekokojakauman graafinen kuvaus

Rakennekerrokset	Tuki- väli-, eristys- ja suodatinkerrosten yhdessä muodostama kokonaisuus
Rata	Tarkoitetaan sitä kokonaisuutta johon kuuluu <ul style="list-style-type: none"> – yksi tai useampi raide – raiteiden tukikerrokset – kaikki maaston pinnanmuodostuksen tasaamiseksi tarvittavat rakenteet, kuten penkereet ja leikkaukset, veden poisjohtamiseksi tarvittavat ojat, roudan torjumiseksi ja radan vakavoittamiseksi sekä raiteen kannattamiseksi tarvittavat rakenteet – kaikki radan rakenteeseen kuuluvat ja liikenteen hoitamiseen tarvittavat erikoisrakenteet ja -laitteet, kuten sillat, rummut, turvalaitteet ja sähköistyksen vaatimat laitteet
Ratapenger	Koostuu radan rakennekerroksista ja mahdollisesta penger-täytteestä
Rautatie	Tarkoitetaan sitä kokonaisuutta johon kuuluu <ul style="list-style-type: none"> – yksi- tai useampiraiteisen radan – kaikki rakennukset ja laitteet, jotka tarvitaan liikenteen hoitamiseksi ja turvaamiseksi – kaikki alueet, jotka tarvitaan rataa, rakennuksia ja laitteita sekä liikenteen hoitamista ja kaikkea siihen liittyvää toimintaa varten
Tiiviysluku (suhteellinen tiiviys)	Ilmaisee kitkamaalajin tiiviysasteen verrattuna standardisoidulla laboratoriokokeella määritettyyn löyhimpään ja tiiveimpään tilaan
Tiiviysaste	Ilmaisee luonnon maan tai täytön kuivatilavuuspainon ja standardisoidulla tiivistyskokeella saadun maksimi kuivatilavuuspainon suhteen
Työtapatarkkailu	Maapenkereiden ja rakennekerrosten tiiveyden valvontamenetelmä, joka käsittää kerrospaksuuksien, jyräskertojen ja materiaalien laadunvalvonnan

A	amplitudi
C_C	rakeisuuskäyrän kaarevuutta kuvaava luku
C_U	materiaalin lajittuneisuutta kuvaava luku
CMV	jyriin liitettävän Compactometer- tiiviysmittauslaitteen tiivisarvo
D	tiiviysaste
D_i tai d_i	rakeisuuskäyrän i:n osoittamaa läpäisyprosenttia vastaava seulakoko
R	kaarresäde [m]
Evib	Bomagin jyrien tiiviysmittauslaitteen tiivisarvo
E_1	ensimmäisen kuormitusvaiheen muodonmuutosmoduuli [MPa]
E_2	toisen kuormitusvaiheen muodonmuutosmoduuli [MPa]
F	voima [N]
H	pudotuskorkeus [m]
P	teho [W]
Q	pistemäinen voima [N]
S	painuma [m]
V	nopeus [km/h]
V	tilavuus [m ³]
W	työ [Nm]
a	kiihtyvyys [m/s ²]
f	frekvenssi [1/s]
m	massa [kg]
m_k	näytteen kuivapaino [kg]
m_m	näytteen märkäpaino [kg]
p	hydrostaattinen paine [kPa]
γ	kuivatilavuuspaino [kg/m ³]
$\gamma_{d,maks}$	maksimikuivatilavuuspaino [kg/m ³]
q	jännitys [kPa]
r	säde [m]
s	pyörähdysmatka [m]
t	aika [t]
w_k	vesipitoisuus massaprozenttina kuivapainosta [%]
$\Delta\sigma$	pintapaineen muutos [kPa]
ΔS	painuman muutos [m]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	jännitykset pääjännityssuunnissa [kPa]
$\sigma_1, \sigma_3, \sigma_t$	pudotuspainolaitteen taipumasuppilon painuma-arvoja numeron osoittaman anturin kohdalla
#	seulan silmäkoko [mm]

1. JOHDANTO

Radalta edellytettävä toiminnallisuus, toimintavarmuus ja turvallinen käytettävyys edellyttävät sen rakenteilta verrattain tiukkoja laatuvaatimuksia. Radan alusrakenteelta edellytettävä 100 vuoden käyttöikä asettaa jo tältä osin korkeat laatuvaatimukset rakenteissa käytettäville materiaaleille. Lisäksi radan alusrakenteessa käytettävien materiaalien ominaisuuksien tulee olla sellaisia, että niillä voidaan rakentaa yhdessä radan päällysrakenteen kanssa kiskoilla liikennöiville kalustoille riittävän vakaa ja turvallinen liikennöintialusta.

Alusrakenteen pääasiallisena tehtävänä on jakaa kuormia alapuoliselle maa- tai kalliopohjalle sekä yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa estää tai pienentää alla olevien maakerrosten routimisesta aiheutuvat haitalliset muodonmuutokset radassa. Kaikki rataan liittyvät alus- ja pohjarakenteet ovatkin joko hyvin vaativia - esimerkiksi pehmeiköille perustettavat ratapenkereet ja ratakaivannot - tai vaativia pohjarakennuskohteita.

Pääosa Suomen rataverkosta on rakennettu 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alkupuoliskolla. Tuolloin ei ole ollut käytössä nykyisen kaltaisia laatuvaatimuksia materiaalien rakeisuudelle tai laadulle. Nykyiselläkin rataverkolla on edelleen eri aikakausilla rakennettujen alusrakenteiden materiaaleja, sillä ratojen perusparannusten yhteydessä uudet rakenteet on rakennettu yleensä vanhojen päälle. Tarkempia laatuvaatimuksia materiaaleille on ollut käytössä vasta 1960-luvulta lähtien. Luonnon maalajeista rakennettavan välikerroksen materiaalivaatimukset eivät ole muuttuneet vuodesta 1970 nykypäivään. Eristyskerroksen materiaalivaatimukset ovat muuttuneet 70-luvulta siten, että nykyään eristyskerroksen alaosan materiaaleissa sallitaan aikaisempaa vähemmän 0,25–1 mm raekoon ainesta. Myöskään eristyskerroksen yläosassa ei käytetä yhtä hienorakeista materiaalia kuin aiemmin. (Saarinen 2008)

Rakenteen tiiviys on yksi tärkeimmistä karkearakeisten materiaalien pitkäaikaiseen muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttavista tekijöistä. Eristys- ja välikerrosten tiiviytä ja kantavuutta koskevien vaatimusten on viime aikoina todettu olevan puutteellisia ja osin hieman ristiriitaisiakin. Epätyydyttävien rakenteiden materiaaliominaisuuksia ja tiiviyyttä on jouduttu usein selvittämään jälkikäteen rakenteen epäsuotuisan käyttäytymisen takia ja monesti myös jo rakennusaikana kun vaatimukset eivät ole täyttyneet. Muutama hiljattain valmistunut projekti on osoittanut, että nykyisten vaatimusten mukaisia alusrakennemateriaalien rakeisuuksien ja valmiilta alusrakenteilta vaadittavien kantavuuksien ohjearvojen vaikutusta ongelmiin olisi syytä tutkia.

Valmiiden ratarakenteiden ja rakennekerrosten kantavuus- ja tiiviysvaatimusten täyttymistä on pääsääntöisesti valvottu työtapatarkkailuna ja kantavuusmittauksin. Ra-

kenteen on todettu olevan riittävän tiivis, kun sitä on tiivistetty materiaali- ja tiivistyskalustokohtaisesti ennalta määritetyn yliajokertojen verran ja sen valmiilta pinnalta mitattu kantavuusarvo on täyttänyt rakenteelle asetetut vaatimukset. Vaikka rakenne täyttäisi, edellä esitetyllä tavalla mitattuna, sille asetetut laatuvaatimukset, on joissakin rakenteissa todettu ilmenevän hyvinkin pian kantavuus- ja vakavuuspuutteita. Nämä taas ovat lähes poikkeuksetta seurauksia rakenteen riittämättömästä tiiviydestä.

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää ratarakenteissa käytettävien materiaalien rakeisuuksien ja tiivistysmenetelmien vaikutusta tarkkailumittauksilla todennettuihin radan alusrakenteen tiiviyksiin, sen päältä saataviin kantavuuksiin ja rakennekerrosten tiivistettävyyteen. Työssä tutkitaan edellä mainittuja asioita toteutuneiden ratahankkeiden kelpoisuuskirjoihin dokumentoiduista aineistoista.

Lisäksi työssä perehdytään ratarakentamisessa käytettäviin ratapenkereen tiiviyden laadunvalvontamenetelmiin ja selvitetään, mitä eri menetelmillä todellisuudessa mitataan ja kuinka niiden avulla pystytään arvioimaan rakenteen käyttökelpoisuus ratarakenteessa. Tulosten pohjalta laaditaan erillinen tiivistystyöohje hyödynnettäväksi tulevilla rakennuskohteilla.

2. RADAN RAKENNE JA YLEISET LAATUVAA- TIMUKSET

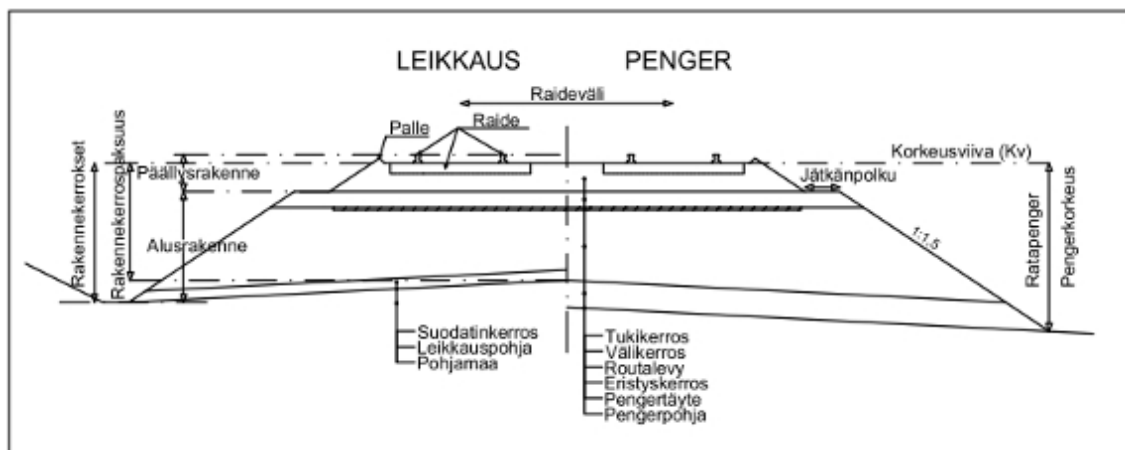
2.1. Radan rakenne

Ratapenger koostuu pääasiassa päällys- ja alusrakenteesta sekä mahdollisesta pengertäytteestä. Päällysrakenteeseen kuuluvat tukikerros ja raide. Alusrakenne koostuu väli- ja eristyskerroksista sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevyistä.

Radan rakennekerrokset rakennetaan pengerrretylle, leikatulle tai niin sanotusti nollatasatulle alustalle. Rakennettaessa rata pengertämällä, pintamaan poiston jälkeen luonnollinen maan pinta tasataan ja korotetaan pengertäytteellä radan alusrakenteen alapinnan korkoon.

Leikatussa ratarakenteessa rataa ympäröivä luonnollinen maanpinta on alusrakenteen alapintaa korkeammalla. Tällöin pohjamaata joudutaan leikkaamaan pois, jotta radan rakennekerrokset voidaan rakentaa suunniteltuun korkoon ja paksuuteen.

Nollatasatussa ratarakenteessa rakennekerrokset voidaan rakentaa pintamaan poiston jälkeen suoraan pohjamaan päälle, ilman suurempia leikkaus tai pengerrystoimenpiteitä.



Kuva 1: Radan rakennesein liittyviä nimityksiä (Ratahallintokeskus 2008)

2.1.1. Normaalipoikkileikkaus ja sen määräytyminen

Ratapengerin dimensioiden minimimitat on hyvin tarkkaan määritetty erilaisille radan poikkileikkaustyypeille. Erilaisten poikkileikkaustapausten minimimittoja esitetään radan normaalipoikkileikkauksissa, joiden tyyppi määräytyy muun muassa radalla sallitavan liikennöintinopeuden, rakennus- ja alustatyyppien (leikkaus/pengerrys/kallioleikkaus) ja

raiteiden lukumäärän mukaan. Normaalipoikkileikkausten tyypit nimetään lyhentein, kuten esimerkiksi Jk-1-LB900-6,8, joissa ilmoitetaan

- raidetyyppi
- raiteiden lukumäärä
- tieto siitä, sijaitseeko rata leikkauksessa, kalliroleikkauksessa vai penkereellä
- ratapölkkytyyppi
- tukikerroksen materiaali
- rakennekerrosten kokonaispaksuus
- rakenteen pengerleveys

Eri lyhenteiden merkitykset on lueteltu julkaisun Ratatekniset ohjeet osa 3, Radan rakenne (Ratahallintokeskus 2008) kappaleessa 3.11.

Normaalipoikkileikkaukset on tarkoitettu ohjeellisiksi ja niiden pohjalta voidaan tarvittaessa laatia hankekohtaiset tyyppipoikkileikkaukset ja paalukohtaiset poikkileikkaukset. Radan normaalipoikkileikkaukset on esitetty julkaisun Ratatekniset ohjeet osa 3, Radan rakenne (Ratahallintokeskus 2008) liitteessä 2.

Radalla sallittava liikennöintinopeus määrää radan alusrakenteelta vaadittavan alusrakenneluokan, jonka perusteella radan pengerleveys ja routasuojaustarve pääosin määräytyvät. Pengerleveys ja pääosin routamitoituksen kautta määräytyvä rakenteen kokonaispaksuus ovat oleellimmat radan poikkileikkauksen dimensioiden määräytymiseen vaikuttavat tekijät.

Alusrakenneluokka

Radan alusrakenteen mitoitusta ajatellen radat on jaettu viiteen alusrakenneluokkaan. Alusrakenneluokka määräytyy radalla liikennöiville henkilö- ja tavarajunille sallitun liikennöintinopeuden mukaan. Alusrakenneluokat on numeroitu 0:sta 4:ään siten, että alusrakenneluokka 0 käytetään hitaimmin liikennöidyillä radoilla ja vastaavasti alusrakenneluokka 4 käytetään suurilla nopeuksilla liikennöidyillä radoilla. Alusrakenneluokat ja niiden määräytymisperusteet on esitetty taulukossa 1. Alusrakenneluokka määräytyy joko henkilö- tai tavaraliikenteen mukaan riippuen kumman vaatimustaso on korkeampi. Vaihteet kuuluvat aina alusrakenneluokkaan 4. (Ratahallintokeskus 2008)

Taulukko 1: Alusrakenneluokat (Ratahallintokeskus 2008)

Alusrakenneluokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, V[km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 225kN akselipainolla, V[km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 250kN akselipainolla V[km/h]
0	≤50	≤40	≤40
1	≤120	≤100	≤60
2	≤200	≤100	≤80
3	≤250	≤120	≤100
4	>250	>120	>100

Pengerleveys

Radan pengerleveydellä tarkoitetaan leveyttä, johon alusrakenteen ylin kerros rakennetaan. Pääsääntöisesti tämä tarkoittaa välikerroksen yläpinnan leveyttä. Radan pengerle-

veyden määrittämiseen vaikuttaa suurimmalta osin raiteiden lukumäärä, alusrakenneluokka, radan geometria ja raideväli. Lisäksi välillisesti pengerleveyteen vaikuttavia asioita ovat tukikerroksen leveys, mitoitusnopeus, akselipaino ja sillan läheisyys. Pengerleveyksien minimivaatimukset eri mitoitusapauksissa on esitetty taulukossa 2. (Ratahallintokeskus 2008)

Taulukko 2: Pengerleveyden minimimitat raiteiden lukumäärän, radan alusrakenneluokan ja raidevälin perusteella (Ratahallintokeskus 2008)

Raiteiden lukumäärä ¹⁾	Radan alusrakenneluokka	Pengerleveys [m]		Raideväli [m]
		Suoralla	Kaarteissa	
1	0	5,4 ⁶⁾	5,4 ⁶⁾	-
1	1	5,4 ⁶⁾	5,4 ⁶⁾	-
1	1	6,0 ⁶⁾	6,0 ⁶⁾	-
1	2	6,0 ⁶⁾	6,8 ²⁾⁶⁾	-
1	3	6,8 ⁶⁾	7,2 ³⁾⁶⁾	-
2	1	9,5	9,5	4,1
2	2	10,3	11,1 ⁴⁾	4,3
2	3	11,3	11,7 ⁵⁾	4,5
2	4	12,5	12,5	4,7

1) Kolme- ja useampiraiteisen radan poikkileikkaukset muodostetaan yksi- ja kaksiraiteisen radan normaalipoikkileikkauksista.

2) Pengerleveyttä 6,8m käytetään ainoastaan kaarteissa, joiden $R < 5000\text{m}$, jolloin pengerlevitys tehdään kokonaisuudessaan ulkokaarten puolelle. Pengerleveys 6,0m on kaarteessakin riittävä silloin, kun radan rakenne rajoittuu kiinteään esteeseen (laiturit, kallioleikkaukset, sillat ja tunnelit)

3) Pengerleveyttä 6,8m käytetään suoralla radalla ja 7,2m pengerleveyttä kaarteissa, joiden $R < 5000\text{m}$, jolloin 0,4m epäsymmetrinen pengerlevitys tehdään ulkokaarten puolelle.

4) Pengerleveyttä 11,1m käytetään ainoastaan kaarteissa, jolloin pengerlevitys tehdään kokonaisuudessaan ulkokaarten puolelle. Pengerleveys 10,3m on kaarteessakin riittävä silloin, kun radan rakenne rajoittuu kiinteään esteeseen (laiturit, kallioleikkaukset, sillat ja tunnelit).

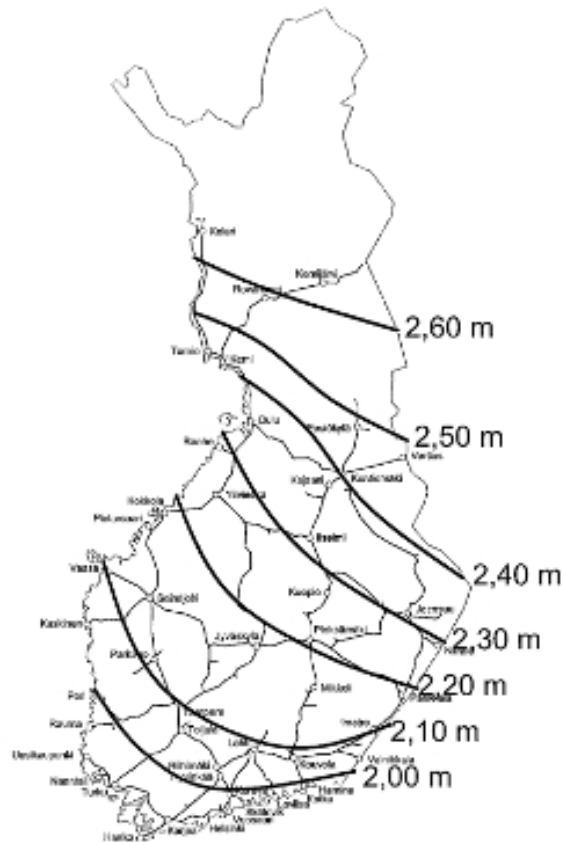
5) Pengerleveyttä 11,3m käytetään suoralla radalla ja 11,7m pengerleveyttä kaarteissa, jolloin 0,4m epäsymmetrinen pengerlevitys tehdään ulkokaarten puolelle.

6) Siltojen päiden penkereen levennys on suunniteltava ratkaisuna, jossa pengerleveys ulottuu 4 metrin etäisyydelle reunimmaisen raiteen keskilinjasta 10m matkalla alkaen sillan siipimuurin päästä ja se muuttuu radan poikkileikkauksen mukaiseksi seuraavan 5m matkalla.

Routamitoitus

Uudet ratarakenteet suunnitellaan siten, että rakenteissa ei esiinny routanoususta aiheutuvia haittoja, radan alusrakenneluokan mukaan määräytyvinä, mitoituspakkasmäärien toistumisjaksoja vastaavina ajanjaksoina. Routaeristämättömillä radoilla routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuudet saadaan alusrakenneluokan 2, 3 ja 4 radoilla kuvasta 2. Alusrakenneluokan 1 radoilla, voidaan kuvan 2 kerrospaksuuksia pienentää 0,2 m ja vastaavasti alusrakenneluokan 0 radoilla 0,6 m. Edellä esitettyjä rakennekerrosten kokonaispaksuuksia pystytään pienentämään käyttämällä ratarakenteessa routalevyjä. Routaeristettyjen ratojen routamitoitus tehdään mitoituspakkamäärän ja vuotuisen ilman

keskilämpötilan perusteella erillisten mitoituskäyrästäöjen avulla.(Ratahallintokeskus 2008)



Kuva 2: Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus (perustuu ilmastotilastoihin kaudelta 1978-2007) (Ratahallintokeskus 2008)

Mikäli radan väli- ja eristyskerros rakennetaan murskatuista kiviaineksista, tulee kuvan 2 mukaisia rakennekerrospaksuuksia kasvattaa 15 %. Pohjamaa luokitellaan aina joko routimattomaksi tai routivaksi. Routivuuden arviointi tehdään julkaisun "Ratojen routasuojaustarpeen selvittäminen, tutkimusohje" mukaisesti. Routimattomalla pohjamaalla olevia ratoja ei routasuojata. (Ratahallintokeskus 2008)

Alusrakenteen ollessa niin sanottu sekarakenne, eli eristyskerroksen ollessa luonnonmateriaaleista ja välikerroksen murskatusta materiaalista, rakennekerrospaksuuksina voidaan käyttää luonnonmateriaaleista rakennettujen alusrakenteiden rakennepaksuuksia.

2.1.2. Rakennekerrokset ja niiden tehtävät

Pengertäyte

Penkereen tehtävänä on tasoittaa maanpinnan luonnollisia korkeusvaihteluita siten, että radan rakennekerrokset voidaan rakentaa sen päälle. Etenkin sivukaltevilla maastoissa penkereen liukumisriskiin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Liukumisen estämiseksi suunnitellut toimenpiteet esitetään työkohtaisessa työselityksessä.

Pengertäytteeseen soveltuvia materiaaleja ovat hiekka ja sitä karkeammat kivennäismaalajit sekä näitä vastaavat moreenimaalajit, murske ja pienlouhe ($\# < 300 \text{ mm}$). Louhetta voidaan käyttää pengermateriaalina, kun pengertäytteen kokonaispaksuus rakennekerrosten alapuolella on vähintään 1m sekä vesistöpenkereissä. (InfraRYL2006, päivitysversio 2009/1) Pengermateriaalien vaatimukset on esitetty tarkemmin kohdassa 2.2.1 Pengermateriaalit

Suodatinkerros

Suodatinkerrosta käytetään leikkauspohjalla estämään rakennekerrosten materiaalien sekoittuminen pohjamaahan. Suodatinkerrosta ei välttämättä tarvita rakenteessa, mikäli niin kutsuttu Terzaghin suodatinkriteeri

$$D_{15} / d_{85} < 5, \quad (1)$$

täyttyy, missä D_{15} on rakeisuudeltaan karkeamman materiaalin (eristyskerrosmateriaali) läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko ja d_{85} on rakeisuudeltaan hienomman materiaalin (pohjamaa) läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko.

Suodatinkerroksena käytetään tyypillisesti hiekkaa tai suodatinkangasta. Suodatinhiekan tulee olla routimatonta eikä sen kapillaarinen nousukorkeus saa ylittää 0,7 m. Suodatinkerroksen korvaamismahdollisuus suodatinkankaalla tulee esittää suunnitelmasiakirjoissa. Murskeesta rakennetun eristyskerroksen alla voidaan käyttää myös murskeesta tehtyä suodatinkerrosta. (InfraRYL2006, päivitysversio 2009/1) Suodatinkerrosmateriaalien vaatimukset on esitetty jäljempänä kohdassa 2.2.2 Alusrakennemateriaalit.

Eristyskerros

Eristyskerroksen tehtävänä on muodostaa välikerrokselle tasainen ja kantava alusta sekä siirtää ja jakaa kuormia alapuoliselle maa- tai kalliopohjalle. Lisäksi eristyskerros, yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa, estää sen alla olevien maakerrosten routimista ja vähentää routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia radassa. Eristyskerroksen tehtävänä on myös estää alapuolella olevien maakerrosten sekoittuminen radan rakennekerroksiin sekä pysäyttää kapillaarinen vedennousu eristyskerroksen alaosaan. (InfraRYL2006)

Eristyskerrokseen soveltuvia materiaaleja ovat hiekka, sora ja kalliomurske. Hiekka ja soralajitteiden tulee olla routimattomia ja rakeisuusohjealueet täyttäviä eivätkä ne saa sisältää orgaanisia tai epäpuhtaita aineita. Materiaalien kapillaarinen nousukorkeus ei saa ylittää 0,7 m. (InfraRYL2006)

Tehtäessä eristyskerros kalliomurskeesta on kiviaineksen laatu selvitettävä ennakkotutkimuksin. Kiviaineksen tulee olla puhdasta ja vastata ominaisuuksiltaan laatuvaatimuksia. Kiviaines ei saa myöskään sisältää epäpuhtauksia, kuten irtomaalajeja, puunkappaleita tai muuta orgaanisperäistä ainesta eikä haitallisessa määrin rapautumisherkkiä mineraaleja. (InfraRYL2006, päivitysversio 2009/1) Eristyskerrosmateriaalien tarkemmat laatuvaatimukset käsitellään kohdassa 2.2.2 Alusrakennemateriaalit.

Välikerros

Välikerroksen tehtävänä on muodostaa tukikerrokselle luja, tasainen ja vettä läpäisevä alusta. Välikerros estää myös eristyskerrosta ja tukikerrosta sekoittumasta toisiinsa sekä lisää rakenteen kantavuutta ja ehkäisee routimisesta aiheutuvia haittoja.

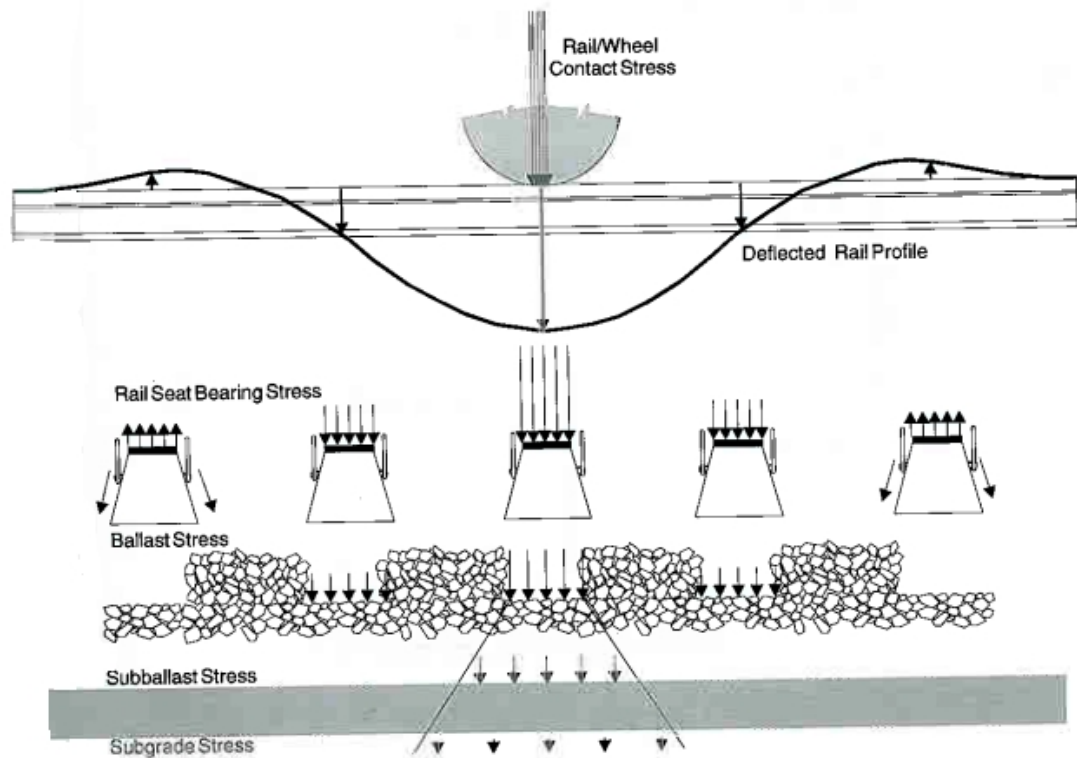
Välikerroksessa käytettäviä materiaaleja ovat hiekka, sora ja kalliomurske, joiden tulee olla routimattomia ja välikerroksen rakeisuusohjealueen vaatimukset täyttäviä. Mikäli eristyskerros tehdään kalliomurskeesta, rakennetaan välikerros samanaikaisesti eristyskerroksen kanssa samasta, vaatimukset täyttävästä, kalliomurskeesta. Välikerroksessa käytettäviä materiaaleja ei saa valmistaa sekoittamalla eri materiaaleja keskenään. (InfraRYL2006, päivitysversio 2009/1)

Tukikerros

Tukikerroksen tehtävänä on pitää raide geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa, jakaa kuormia alusrakenteelle ja muodostaa raiteelle tasainen ja kantava alusta. Tukikerroksen mitat määräytyvät rataluokan, suurimman sallitun nopeuden, kiskopituuden, tukikerrosmateriaalin ja ratapölkkytyypin perusteella. Tukikerros voidaan rakentaa joko sepeli- tai sorarakenteena. (Ratahallintokeskus 2004, InfraRYL2006)

2.2. Ratarakenteissa käytettyjen materiaalien laatuvaatimukset

Ratapenkereen pitkän käyttöikävaatimuksen ja raiteiden tasaisuudelle asetettavien korkeiden vaatimusten takia myös ratapenkereen materiaalien täytyy täyttää tiukat, hyvin tarkoin määrätyt ehdot, jotta rakenteelta vaadittavat ominaisuudet täytyisivät. Ratapenkereessä eri rakennekerroksissa käytettävien materiaalien ominaisuuksien tulee olla sellaisia, ettei rakenteeseen pääse syntymään sen käyttöiän aikana deformaatioita, eli pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 3: Tyypillinen kiskokuorman jakautuminen radan rakennekerrokseen (Selig et al 1994)

Ratapenkereeseen kohdistuvia kuormituksia syntyy niin liikenteen kuin ympäristönkin vaikutuksesta. Liikenteen aiheuttama, toistuva dynaaminen kuormitus on merkittävin yksittäinen penkereeseen kohdistuva kuormitus, jonka välittyminen rakennekerrokseen on kuvattu kuvassa 3. Rakenteeseen kohdistuvien toistuvien pystysuuntaisten jännityssykliden ja kuorman liikkumisesta aiheutuvan, yksittäisiin maa-alkioihin kohdistuvan, pääjännityssuunnan kierron aiheuttaman rasituksen vastaanottaminen ja kestäminen vaatii materiaalilta riittävää jäykkyyttä, jota ilmaistaan moduuliarvolla. Materiaalin jäykkyyteen eli moduuliarvoon vaikuttavia tekijöitä taas ovat muun muassa:

- materiaalin jännitystaso ja -tila
- tiiviystila
- kosteustila (vuodenaikojen vaihtelun vaikutus)
- rakeisuusjakautuma, etenkin hienoainespitoisuus, maksimiraekoko ja jakautuman muoto
- kiviaineksen ominaisuudet, mineralogia, raemuoto ja pinnan karkeus
- allia olevien rakennekerrosten jäykkyys. (Kolisoja 2009b)

Suuren moduuliarvon omaaviin materiaaleihin aiheutuu tietynsuuruudesta kuormituksesta pienemmät kokonaismuodonmuutokset kuin samansuuruisen kuorman vaikuttaessa pienemmän moduuliarvon omaaviin materiaaleihin. Toisaalta, mitä suurempi materiaaliin syntyvä muodonmuutos on, sitä suurempi osa siitä jää kuormituksen poistuessakin pysyväksi muodonmuutokseksi. Maa-alkioihin kohdistuvat jännityssyklit aiheuttavat niihin aina pientä liikettä, etenkin heikosti tiivistetyissä rakennekerroksissa. Maa-alkioiden hiertyessä toisiaan vasten ne hienonevat. Rakenteen elinkaaren aikana hienoneminen voi

olla hyvinkin suurta muuttaen materiaalin raekokojakautumaa. Pahimmillaan hienoneminen aiheuttaa materiaalin muuttumisen routivaksi. Tämä rakenteen elinkaaren aikainen materiaalien hienoneminen on pyritty ottamaan huomioon eri rakennekerroksien materiaalien rakeisuusohjealueita määriteltäessä, jotta ne täyttäisivät niiltä vaaditut laatuvaatimukset koko käyttöikävaatimuksen ajan.

Ympäristöstä aiheutuvia kuormia ratapenkereen materiaaleille syntyy rakenteessa ja rakenteen pinnalla olevan kosteuden ja veden ja lämpötilavaihteluiden vaikutuksesta. Äkilliset lämpötilamuutokset, lämpötilan vaihtelut 0 °C molemmin puolin, rakenteen jäätyminen ja routiminen aiheuttavat toistuvuudellaan voimakkaita, materiaaleja voimakkaastikin muokkaavia kuormituksia.

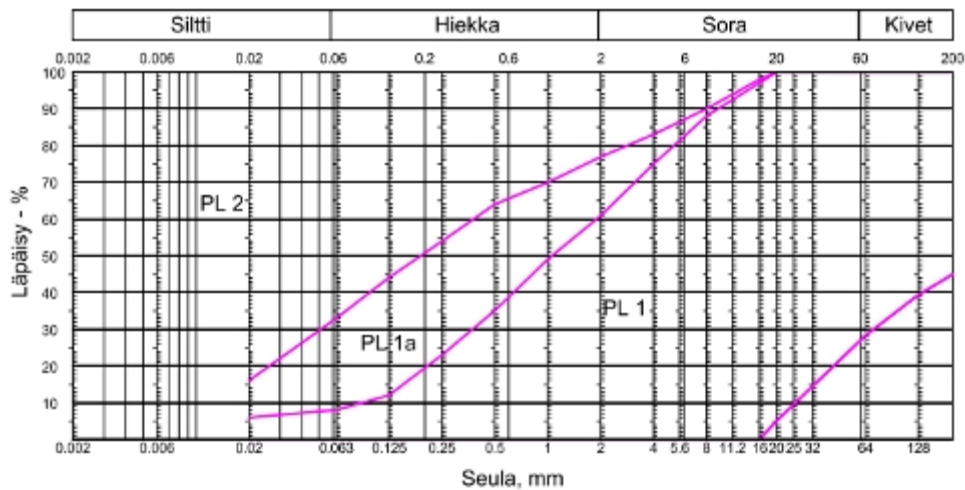
Luonnonmateriaaleilla tarkoitetaan yleisesti sellaisia maamateriaaleja, joita esiintyy luonnossa niiden käyttöolomuodossa. Ratarakenteissa näitä ovat käytännössä hiekka ja soralajikkeet. Edellä mainituista lajitteista seulomalla muodostetut maalajikkeet katsotaan myös luonnonmateriaaleiksi. Sen sijaan eri luonnonmateriaaleja keskenään sekoittamalla valmistettuja maalajikkeita ei katsota luonnonmateriaaleiksi. Tällaisten materiaalien käyttö radan eristys- ja välikerroksissa onkin kielletty. Murske on louheesta, loh-kareista, sorasta tai moreenista murskaamalla ja yleensä lisäksi myös seulomalla valmistettua maa- ja kiviainesta. Louheella tarkoitetaan kalliosta räjäyttämällä tai rusnaamalla irrotettua murskaamatonta kiviainesta. Lohkareiden rikkomisesta syntyvä kiviaines luokitellaan myös yleisesti louheeksi.

Lajittumattomat maa-ainekset tiivistyvät helposti, kun taas lajittuneita kitkamaalajeja on huomattavasti vaikeampi tiivistää. Tasarakeisten, varsinkin karkeiden kitkamaalajien ja murskeiden tiivistymistä vaikeuttaa osaltaan myös se, että materiaalissa ei saada pysymään optimivesimäärää, vaan vesi valuu pois. Maa-aineksen kivisyydellä ja karkeiden rakeiden raemuodolla on myös oma vaikutuksensa tiivistystyössä. Litteitä ja pitkulaisia rakeita sisältävien maalajien tiiviys jää huonommaksi kuin muodoltaan pyöreitä ja kuutiomaisia rakeita sisältävien maalajien tiiviys. Tiivistyksen aikana rakeisuus muuttuu hienompaan suuntaan varsinkin kiviaineksen lujuuden ollessa huono. Tämä koskee erityisesti kalliomurskeita, joiden kivirakeiden kulmat murtuvat ja pyöristyvät helposti. Hyvälaatuinen murske ei kuitenkaan huonone jyräämällä kelvottomaksi ja läpäisyprosenttien muutokset ovat tyypillisesti alle 2 %. (Hartikainen 2002)

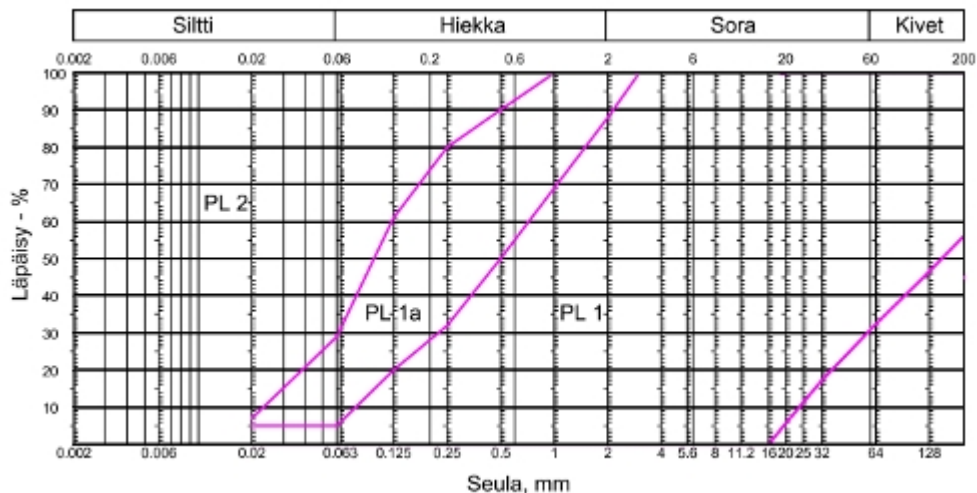
2.2.1. Pengermateriaalit

Tässä luvussa käsitellään ainoastaan maapenkereissä ja maalle rakennettavissa louhepenkereissä käytettäviä materiaaleja. Näiden lisäksi pengermateriaaleja voidaan käyttää radan stabiliteettia lisäävissä vastapengerrakenteissa tai hienorakeisten maakerrosten tiivistämisessä käytetyissä esikuormitus- ja ylipenkereissä. Molemmista edellä mainituissa tapauksissa on omat maa- ja louhepenkereissä käytettävistä maa-aineksista eriävät materiaalivaatimukset. Ratarakenteiden maa- ja louhepengermateriaaleina voidaan käyttää hiekkaa ja sitä karkeampia kivennäismaalajeja, näitä vastaavia moreenimaalajeja, mursketta ja pienlouhetta.

Karkearakeisten ja moreenimaalajien soveltuvuus pengermateriaaliksi on esitetty kuvissa 4 ja 5. Materiaalit eivät saa sisältää kiviä tai lohkareita, joiden läpimitta on suurempi kuin 2/3 kerralla tiivistettävän kerroksen paksuudesta. Penkereiden maa-ainekset eivät saa sisältää myöskään haitallisia määriä epäpuhtauksia. Talvityöskentelyssä tulee huomioida, ettei käytettävä materiaali sisällä lunta, jäätä tai jäätyneitä maakokkareita tai materiaaleja. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1) Karkearakeisten ja moreenimaalajien soveltuvuus pengermateriaaliksi on jaettu kolmeen alueeseen, PL1, PL1a ja PL2. Ennen materiaalien käyttöönottoa niiden kelpoisuus pengermateriaaliksi tarkistetaan rakeisuuden perusteella ja niistä tulee määrittää maalaji ja vesipitoisuus. Materiaalit, joiden rakeisuus sijoittuu ohjealueelle PL1 soveltuvat pengermateriaaliksi. Rakeisuuden sijoittuessa alueelle PL1a, on materiaalin soveltuvuus esitettävä suunnitelmasiikirjoissa ja siihen vaikuttavat paikalliset olosuhteet, kuten vesipitoisuus, häiriintymisherkkyys, pohjavedenpinnan sijainti ja rakennusvuodenaika. Alueen PL1a materiaalien hienoainespitoisuuden ($\# < 0,063\text{mm}$) tulee olla alle 35 %. Alueen PL2 materiaalit soveltuvat ainoastaan vastapenkereisiin.



Kuva 4: Moreenin soveltuvuus pengermateriaaliksi ratapenkereissä

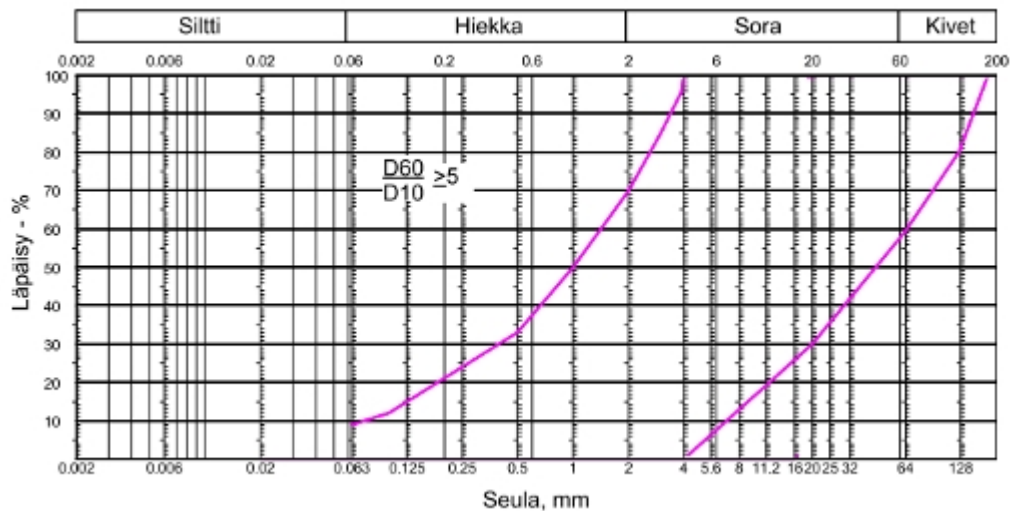


Kuva 5: Karkearakeisten maalajien soveltuvuus pengermateriaaliksi ratapenkereissä

Ratapenkereessä käytettävän kalliomurskeen raekoon tulee olla välillä #0...150 mm. Läpäisyarvoja 60 % ja 10 % vastaavien raekokojen perusteella laskettavan raekokosuhteen tulee täyttää ehto

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 5. \quad (2)$$

Edellä esitetyllä raekokosuhteella pyritään kuvaamaan materiaalin lajittuneisuutta. Materiaalin katsotaan olevan tasarakeinen, jos $C_u < 5$, sekarakeinen jos $5 \leq C_u \leq 15$ ja suhteistunut kun $C_u > 15$. Kalliomurskeen rakeisuuden ohjealue on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Kalliomurskeen soveltuvuus pengermateriaaliksi ratapenkereissä

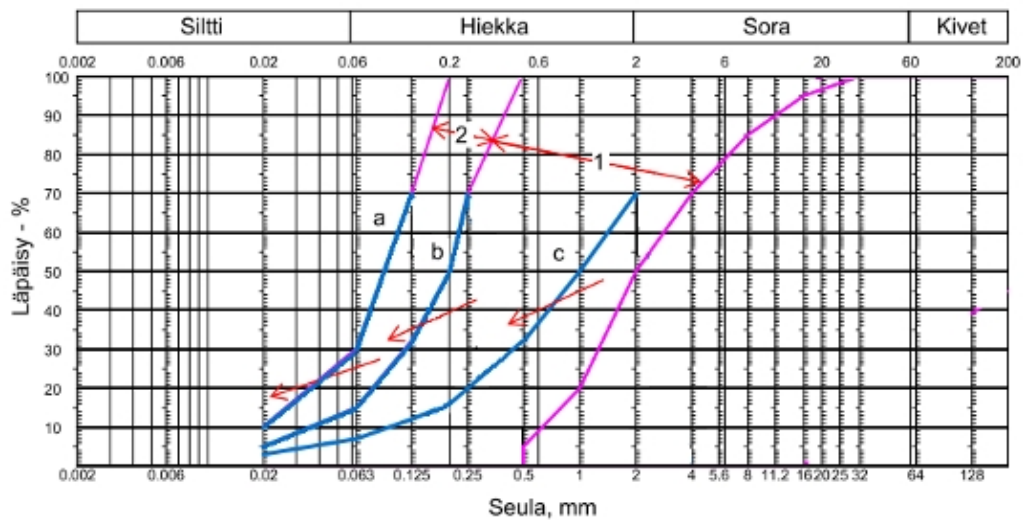
Louhetta voidaan käyttää ratapenkereiden materiaalina, kun penkereen korkeus on vähintään 1 metri. Louheen tulee olla sekarakeista täytön tyhjätilojen minimoimiseksi. Louhemateriaali ei saa olla routivaa tai rapautunutta. Materiaali ei saa sisältää lohkaraita, joiden läpimitta on suurempi kuin 2/3 ja penkereen yläosassa 1/2 kerralla tiivistettävän kerroksen paksuudesta. Louheen maksimiraekoko ratapenkereessä on #300 mm. Louhepengeri tulee kiilata 300 mm paksulla routimattomalla murskekerroksella, jonka rakeisuus on #0...63 mm. (InfraRYL 2006)

2.2.2. Alusrakennemateriaalit

Radan alusrakenteissa käytettäviä materiaaleja ovat käytännössä luonnonmateriaaleista vain hiekka- ja soralajitteet ja kalliomurskeet. Sekä suodatin-, eristys- että välikerroksessa voidaan käyttää luonnonmateriaaleja tai kalliomurskeita. Materiaaleille on määritetty käyttökohdekohtaiset vaatimukset, joissa on huomioitu rakenteiden käyttötarkoitukset ja niihin kohdistuvat kuormat ja rasitukset. Rakennekerroksissa käytettävien materiaalien kelpoisuus osoitetaan ensisijaisesti CE-merkinnällä tai sen puuttuessa asianomaisen ministeriön tuotehyväksynnällä tai rakennuspaikkakohtaisilla kokeilla. (InfraRYL 2006)

Suodatinkerrosmateriaalit

Suodatinkerroksessa voidaan käyttää hiekkaa, jonka rakeisuus on kuvan 7 ohjealueen mukainen tai #2..4 mm kalliomursketta, jonka rakeisuus täyttää kaavan 1 mukaisen Terzaghin suodatinkriteerin. Kalliomurskeen käyttö on sallittua vain, kun eristyskerros rakennetaan kalliomurskeesta. Suodatinkerroksen rakeisuuden tulee normaalisti sijoittua kuvan 7 mukaisen käyrästön alueelle 1. Alueelle 2 sijoittuvan materiaalin käyttö on sallittu suunnitelma-asiakirjoissa osoitetuissa hyvin kuivatetuissa paikoissa. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää kuvan sinisiä viivoja punaisten nuolten suunnassa. Suodatinkerros- materiaalin rakeisuus tulee määrittää vähintään 2000 t välein. Lisäksi joka neljännessä näytteestä tarkistetaan kapillaarinen nousukorkeus.



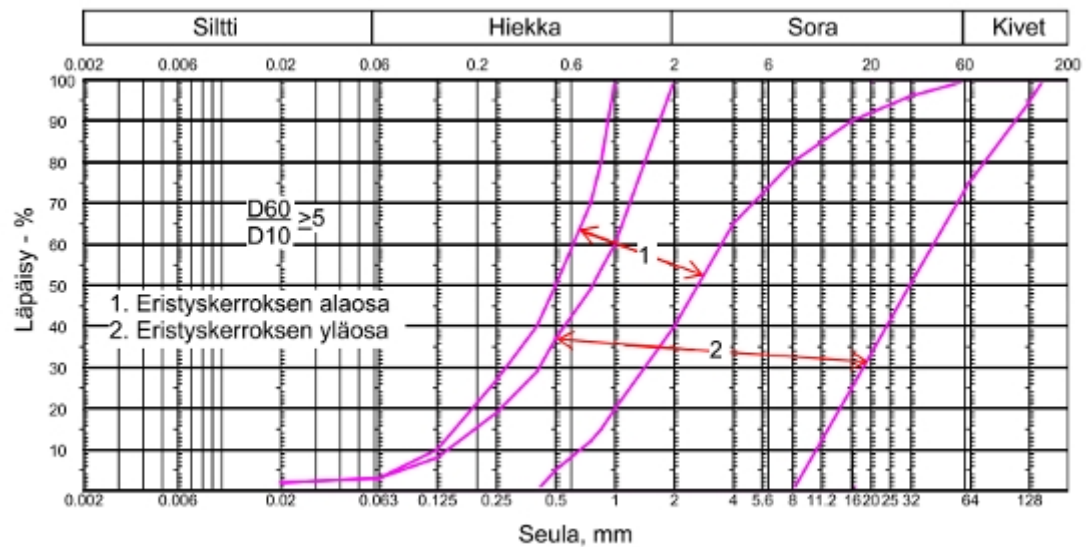
Kuva 7: Suodatinkerrosmateriaalin rakeisuusohjealue ratarakenteessa

Suodatinkerroksen materiaali ei saa sisältää silmämääräisesti arvioiden savea eikä haitallisia epäpuhtauksia, kuten humusmaata. Kapillaarisuuden tulee olla $\leq 0,7$ m, jolloin materiaalin voidaan olettaa olevan routimatonta. Suodatinkerroksen vähimmäispaksuus sekä hiekasta että kalliomurskeesta rakennettaessa on 300 mm. Hyvin usein ratarakenteissa suodatinkerros korvataan suodatinkankaalla. Suodatinkankaan käyttö on kuitenkin sallittu ainoastaan työkohtaisen työselityksen mukaisesti. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Eristyskerrosmateriaalit

Eristyskerroksessa voidaan käyttää luonnonmateriaaleista routimatonta hiekkaa ja soraa tai kalliomursketta. Kiviaineksen rakeisuus tutkitaan pesuseulontana vähintään kerran 5000 t kohti tai niin usein, että vaatimusten mukaisuudesta varmistutaan.

Käytettäessä eristyskerroksessa luonnonmateriaaleja tulee materiaalin olla kuvan 8 ohjealueen mukaista routimatonta hiekkaa ja soraa, jonka rakeisuuskäyrän 60 % ja 10 % läpäisyarvoja vastaavien raekokojen suhde täyttää ehdon $D_{60}/D_{10} \geq 5$ (kaava 2). Materiaali ei saa sisältää orgaanisia eikä epäpuhtaita aineita ja sen kapillaarinen nousukorkeus saa olla korkeintaan 0,7 m.

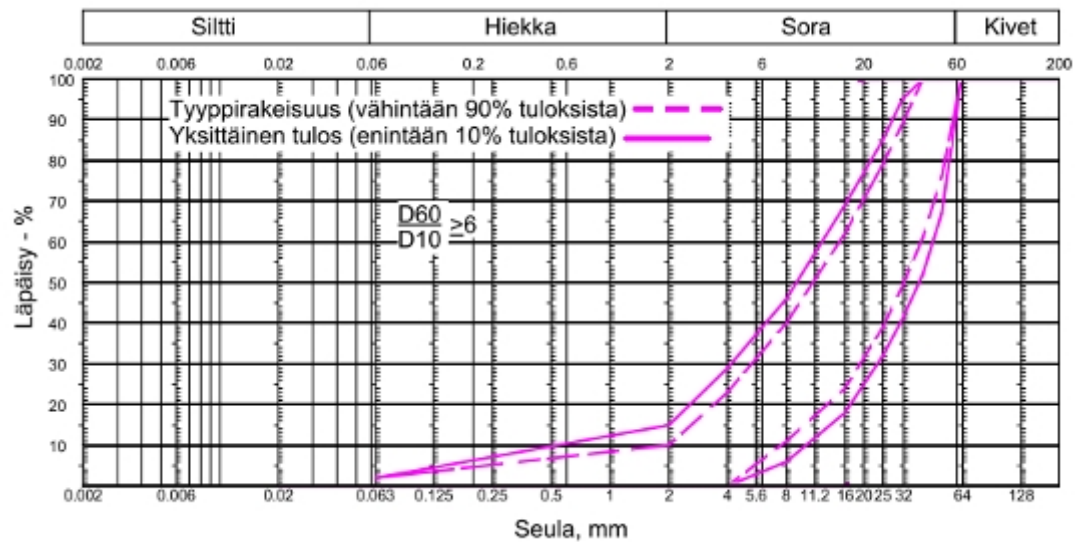


Kuva 8: Luonnonmateriaaleista rakennettavan eristyskerroksen rakeisuusohjealue rata-rakenteessa

Eristyskerroksen alaosassa, jonka paksuus on puolet koko eristyskerroksen paksuudesta, voidaan käyttää kuvan 8 ohjealueen 1 mukaista materiaalia. Vastaavasti eristyskerroksen yläosassa käytetään ohjealueen 2 mukaista materiaalia, jonka maksimiraeko on 150 mm.

Rakennettaessa eristyskerros kalliomurskeesta tulee materiaalin rakeisuuden olla kuvan 9 ohjealueen mukainen. Vähintään 90 % tuloksista on sijoitettava tyyppirakeisuudelle sallitulle katkoviivoilla rajatulle alueelle. Yksittäinen tulos, enintään 10 % tuloksista, voi sijoittua kuvan 9 ohjealueen katkoviivojen ja yhtenäisten viivojen väliselle alueelle. Näiden lisäksi rakeisuuskäyrän 60 % ja 10 % läpäisyarvoja vastaavien raekokojen suhteen tulee olla 90 % tuloksista vähintään 6. Alle 10 % tuloksista saa olla alle 6, mutta tällöinkin raekokosuhteen tulee olla vähintään 4. Materiaalin hienoainespitoisuus, eli seulan 0,063 mm läpäisevän aineksen osuus, tulee määrittää pesuseulontana, eikä se saa olla yhdessäkään seulontatuloksessa korkeampi kuin 2 %. Kiviaineksen tulee olla puhdasta irtomaalajeista, puunkappaleista ja muista orgaanisperäisistä aineksista ja ominaisuuksiltaan laatuvaatimuksia vastaavaa. (InfraRYL 2006, päivitysversion 2009/1)

Jotta kiviaines pysyisi ohjealueen mukaisena, se ei saa sisältää haitallisessa määrin rapautumisherkkiä mineraaleja. Eristyskerroksessa käytettävän kiviaineksen mineraalikoostumus tulee selvittää ohuthietutkimuksen perusteella. Pehmeiden mineraalien, erityisesti kiilteiden, esiintymisestä kiviaineksessa tulee olla tarkkana. Pehmeät mineraalit hienonevat kuormitetuissa rakenteissa helposti, lisäten näin materiaalin hienoainespitoisuutta, mikä heikentää materiaalin rakenteellisia ominaisuuksia ja mahdollisesti muuttavat sen vaatimukset täyttämättömäksi. Eristyskerroksessa käytettävän kalliomurskeen kiviaineksen eri mineraalien sallitut esiintymismäärät on esitetty yksityiskohtaisemmin julkaisussa InfraRYL 2006, päivitysversion 2009/1 kohdassa 21220.1.2.



Kuva 9: Kalliomurskeen rakeisuusohjealue yhdistetyssä radan eristys- ja välikerroksessa

Eristys- ja välikerroksissa käytettäville kiviaineksille on asetettu myös lujuusvaatimuksia. Taulukossa 3 on esitetty kiviainekselta vaadittavat lujuusvaatimukset, jotka ovat standardin SFS-EN 13242 mukaisia. Kuormitustasoiltaan alhaisemmissa olosuhteissa, kuten eristyskerroksen alaosassa, voidaan käyttää taulukossa esitetyn mukaisesti hieman heikompaa kiviainesta kuin välittömästi tukikerroksen alapuolella. Rakeisen kiviaineksen iskukestävyyttä kuvataan LosAngeles(LA)-luvulla. Micro-Deval- testillä määritetään kiviaineksen hiovan kulutuksen kestävyttä. Molemmista testeistä määritetään testin aikana kiviaineksesta hienontuneen alle 1,6 mm aineksen prosentuaalinen osuus testinäytteen massasta. Näin ollen kiviaines kestää kulutusta sitä paremmin, mitä pienempiä näiden testien tulokset ovat. Testimenetelmät ja niiden suoritus on kuvattu standardeissa SFS-EN 1097-1 ja SFS-EN 1097-2. Kiviaineksen LosAngeles- ja Micro-Deval- arvoilla pyritään ehkäisemään murskatun kiviaineksen liiallinen hienoneminen sille asetetun käyttöiän aikana.

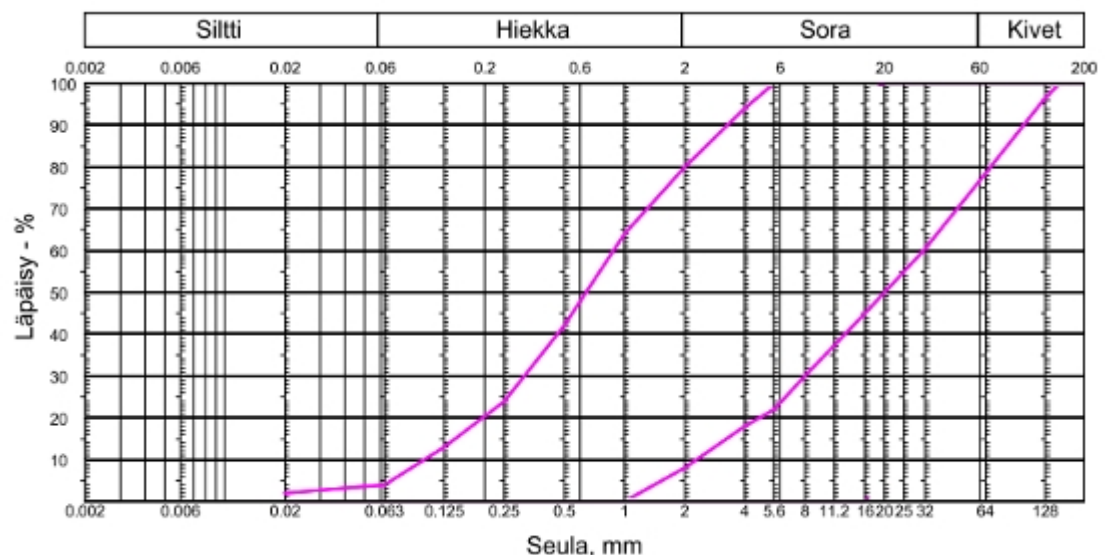
Taulukko 3: Eristys- ja välikerrosten kiviainesten lujuusvaatimukset (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

	Los Angeles luokka ¹⁾		micro-Deval luokka ²⁾
	Vaatus	Edellyttää erityisperusteita	Vaatus
Tason Kv-1500mm yläpuolella	LA ₂₅	LA ₃₀	MD ₁₅
Tason Kv-1500mm alapuolella	LA ₃₀	LA ₃₅	MD ₂₀
¹⁾ Määritellään standardin SFS-EN 1097-2 mukaisesti			
²⁾ Määritellään standardin SFS-EN 1097-1 mukaisesti			

Eristyskerroksen kiviaineksen tulee kestää mahdollisimman hyvin myös toistuvia jäätymis-sulamis -syklejä. Kalliomurskeesta määritetään vedenimeytymisen enimmäismäärä, jolla pystytään tarkastelemaan murskeen jäätymis-sulamiskestävyyttä ja routimisherkkyyttä. Standardin SFS-EN 1097-6 luvun 8 mukaan määritettävä vedenimeytymisen enimmäismäärä saa olla #4..31,5 mm lajitteesta määritettynä 0,5 % (luokka WA_{240,5}). Mikäli kalliomurske ei täytä vedenimeytymiselle asetettuja vaatimuksia, sen rapautumiskestävyydestä ja routimattomuudesta tulee varmistua esimerkiksi jäädytys-sulatus- ja routanousukokeilla.

Välikerros

Välikerroksen materiaaleiksi soveltuvat routimattomat hiekka-, sora- ja kalliomurskelajikkeet. Käytettäessä välikerroksessa luonnonmateriaaleja tulee niiden rakeisuuskäyrien olla kuvan 10 ohjealueen mukaisia. Välikerroksessa käytettäviä materiaaleja ei saa valmistaa sekoittamalla niitä keskenään. Kiviaineksen rakeisuus tutkitaan pesuseulontana vähintään kerran 2000 t kohden tai niin tiheästi, että materiaalin vaatimusten mukaisuudesta varmistutaan. Materiaalin maksimiraekoko on 150 mm.



Kuva 10: Välikerroksen hiekka- ja soralajitteiden rakeisuusohjealue ratarakenteessa

Mikäli eristyskerros rakennetaan kalliomurskeesta, tulee myös välikerros rakentaa samanaikaisesti ja samasta materiaalista kuin eristyskerros. Materiaalin tulee täyttää eristyskerroksessa käytettävälle kalliomurskeelle asetetut vaatimukset ja rakeisuusohjealueet. (InfraRYL 2006, päivitysversion 2009/1)

2.3. Ratarakenteen laatuvaatimukset Suomessa

Valmiille yksittäisille rakennekerroksille ja ratapenkereelle on asetettu tiettyjä vaatimuksia kantavuudelle, tiiviydelle sekä muoto- ja korkeusasemien mittatarkkuuksille.

Erinäisten vaatimusten avulla pystytään hallitsemaan ja toteamaan kohtuullisen helposti rakenteen vaatimustenmukaisuus.

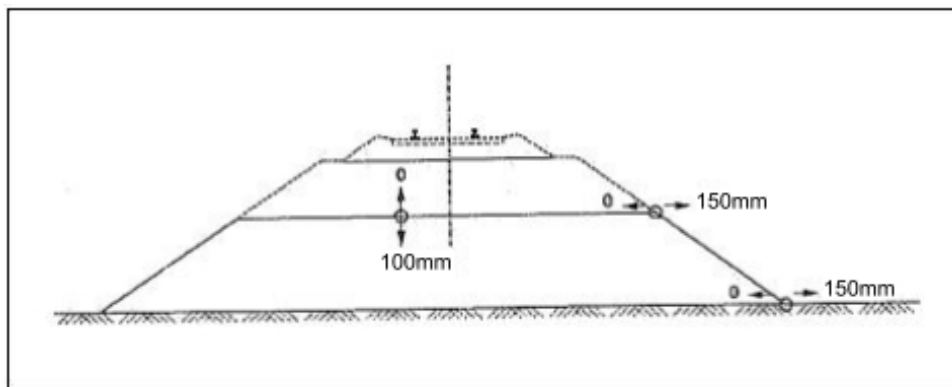
Rakennekerrosten muodon ja korkeusasemien vaatimusten täyttymisiä valvotaan tyypillisesti mittaamalla kerroksen taitepisteiden ja näiden väliltä muutaman pisteen koordinaatit ja vertaamalla niitä suunnitelma-asiakirjoissa esitettyihin arvoihin. Kerroksille asetettujen kantavuus- ja tiiviysarvojen vaatimusten täyttymisten valvontaan on useampiakin menetelmiä, joita esitellään tarkemmin luvussa 4. Tyypillisesti rakenteen tiiviyttä tarkkaillaan työmenetelmätarkkailuna sekä kokeellisesti, mittaamalla rakenteen pinnalta kantavuusarvoa levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella, jolloin tietyn kantavuusarvon ylityttyä on rakenteen katsottu saavuttaneen riittävä tiiviys.

2.3.1. Mittatarkkuusvaatimukset

Maapenger

Maapenkereen tiivistetyn yläpinnan tulee olla muodoltaan ja korkeusasemaltaan suunnitelma-asiakirjojen mukainen. Penkereen pinta ei saa olla suunnitelma-asiakirjojen mukaisen korkeuden yläpuolella. Vettä kerääviä painanteita ei valmiissa pinnassa sallita. Penkereen yläpinnan suurin sallittu keskimääräinen poikkeama alaspäin on 50 mm ja suurin sallittu yksittäinen poikkeama 100 mm. Penkereen luiskien taitepisteet eivät saa olla penkereen keskilinjaan nähden suunnitelma-asiakirjoissa esitettyjä mittoja lähempänä, eikä yli 150 mm kauempana. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Penkereen mitat tarkastetaan maastossa 20 m välein mittaamalla poikkileikkauksen taitepisteet sekä taitepisteiden välit 1 m välein. Kuvassa 11 on esitetty valmiin maapenkereen suurimmat sallitut yksittäiset mittapoikkeamat.



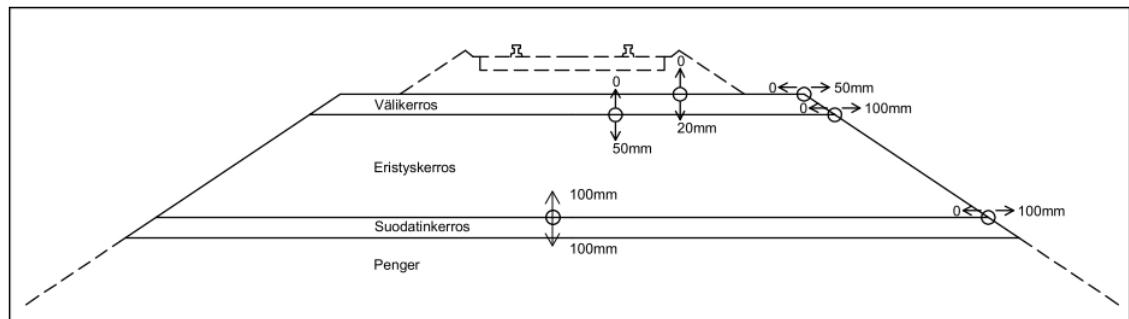
Kuva 11: Maapenkereen tarkkuusvaatimukset ratapenkereessä (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Louhepenkereen kiilattu ja tiivistetty yläpinta tulee olla muodoltaan ja korkeusasemaltaan suunnitelma-asiakirjojen mukainen, eikä sen pinnassa saa olla vettä kerääviä painanteita. Louhepenkereen muodon ja korkeuden sallitut mittapoikkeamat ovat samat kuin edellä esitetyn maapenkereen sallitut poikkeamat.

Suodatin-, eristys- ja välikerros

Radan rakennekerrosten poikkileikkausmitat tarkistetaan tarkemittauksin niin usein, että penkereen muodon ja aseman suunnitelmanmukaisuus voidaan yksiselitteisesti todeta, kuitenkin vähintään 20 m välein. Poikkileikkauksista mitataan taitepisteet ja taitepisteiden välit 1 m välein.

Valmiin, tiivistetyn eristyskerroksen yläpinta ei saa olla suunnitelma-asiakirjoissa esitettyä pintaa korkeammalla, eikä leveyttä kapeampi. Yläpinnan suurin sallittu poikkeama alaspäin on 50 mm ja keskimääräiselle poikkeamalle sallitaan 30 mm alitus suunnitelluista eristyskerroksen yläpinnan koroista. Eristyskerroksen luiskien koroissa pätee samat edellä mainitut vaatimukset. Eristyskerroksen ylä- ja alaleveydet eivät saa olla suunniteltuja kapeampia ja suurin sallittu yksittäinen poikkeama on korkeintaan 100 mm.



Kuva 12: Radan alusrakennekerrosten sallitut mittapoikkeamat

Taulukko 4: Radan alusrakennekerrosten sallitut mittapoikkeamat ja kerrospaksuudet

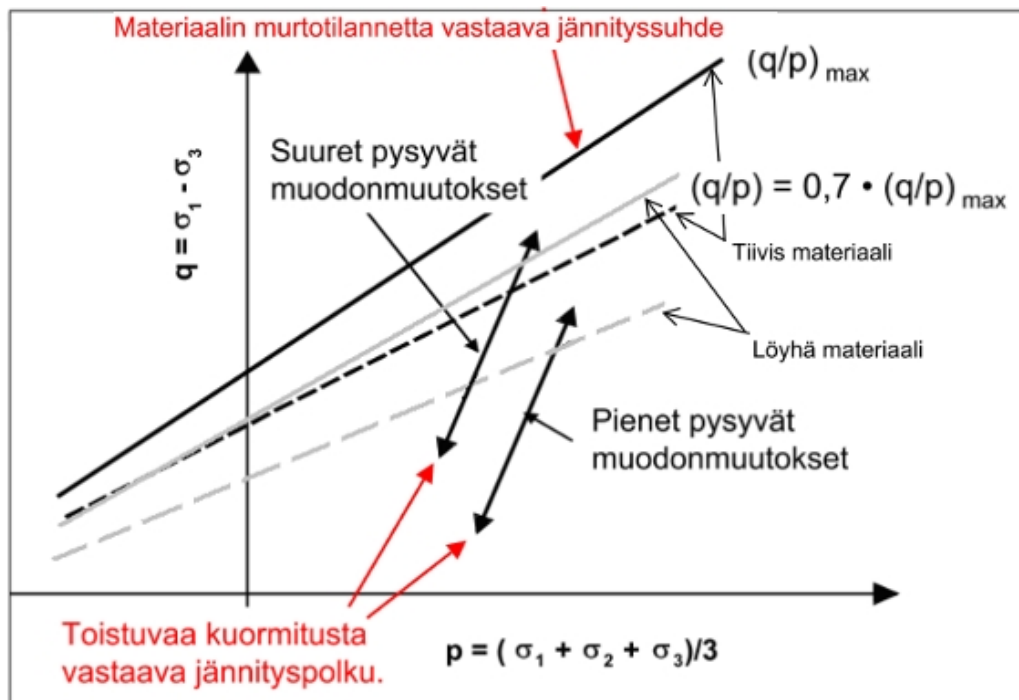
	Suodatinkerros	Eristyskerros	Välikerros
Yläpinnan yksittäinen poikkeama – alaspäin / ylöspäin		-50mm / 0	-20mm / 0
Yläpinna yksittäinen poikkeama – sisäänpäin / ulospäin		0 / +100mm	0 / +50mm
Yläpinnan keskimääräinen poikkeama – alaspäin / ylöspäin		-30mm / 0	
Alaleveyden yksittäinen poikkeama – sisäänpäin / ulospäin		0 / +100mm	0 / +100mm
Kerroksen paksuus	300±100mm		300mm

Välikerroksen valmis, tiivistetty pinta ei saa olla suunnitelma-asiakirjoissa esitettyä korkoja ylempänä, eikä esitettyä leveyttä kapeampi. Yläpinnan suurin sallittu yksittäinen poikkeama alaspäin on 20 mm ja leveyssuunnassa ulospäin 50 mm.

Mikäli rakennekerrokseen tulee suodatinkerros, on sen paksuus 300 mm, johon sallitaan 100 mm alitus tai ylitys. Myös välikerros rakennetaan yhtenä 300 mm kerroksena. Kerrosten sallitut yksittäiset mittapoikkeamat on esitetty kuvassa 12 ja lisäksi taulukossa 4 on esitetty mahdolliset keskimääräiset poikkeamat ja kerrospaksuudet.

2.3.2. Tiiviys- ja kantavuusvaatimukset

Maarakenteiden riittävän laadun takaamiseksi on eri rakennekerroksille asetettu tietyt tiiviys- tai kantavuusvaatimukset, jotka valmiiden rakennekerrosten tulee täyttää. Rakennettavan ja tiivistettävän kerroksen saaminen riittävään tiiviyteen on erittäin oleellinen asia rakenteen kestävyys- ja deformaatioherkkyyden kannalta. Jännityssuhteen q/p avulla, missä deviatorinen jännitys $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ja hydrostaattinen paine $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, voidaan kuvata rakenteessa olevaan materiaaliin kohdistuvien kuormitustilan muutosten kulkua. Kun rakenteeseen kohdistuu toistuva, lähelle materiaalikohtaista maksimijännityssuhdetta $(q/p)_{\max}$ kohoava kuormitus, syntyy rakenteeseen nopeasti pysyviä muodonmuutoksia. Materiaalikohtainen murtotilannetta vastaava jännityssuhde $(q/p)_{\max}$ on tiiviillä materiaaleilla suurempi kuin löyhällä materiaaleilla. Näin ollen mitä tiiviimpänä materiaali on, sitä suurempia kuormituksia se kestää ilman merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia. Kuvassa 13 on havainnollistettu materiaalin tiiviyden vaikutusta deformaatioon toistuvien kuormitusten alaisuudessa.



Kuva 13: Materiaalin lujuuden/tiiviyden periaatteellinen vaikutus deformaatioon toistokuormituksessa (Kolisoja 2009b)

Rakennekerrosten tiiviysvaatimukset ilmoitetaan pääasiassa prosenttiosuuksina parannetulla Proctor-kokeella määritetystä materiaalikohtaisesta maksimikuivatilavuuspainosta. Kokeen yhteydessä määritetään myös optimivesipitoisuus, joka on maalajille ominainen vesipitoisuus, jolla maa-aineksen maksimikuivatilavuuspaino saavutetaan. Tiiviysaste määritetään tällöin mitattavasta rakenteesta määritetyn maa-aineksen kuivatilavuuspainon ja mitattavassa rakenteessa käytettävän maa-aineksen maksimikuivatilavuuspainon suhteena

$$D = 100 * \frac{\gamma}{\gamma_{d,maks}} \quad (3)$$

missä D on tiiviysaste

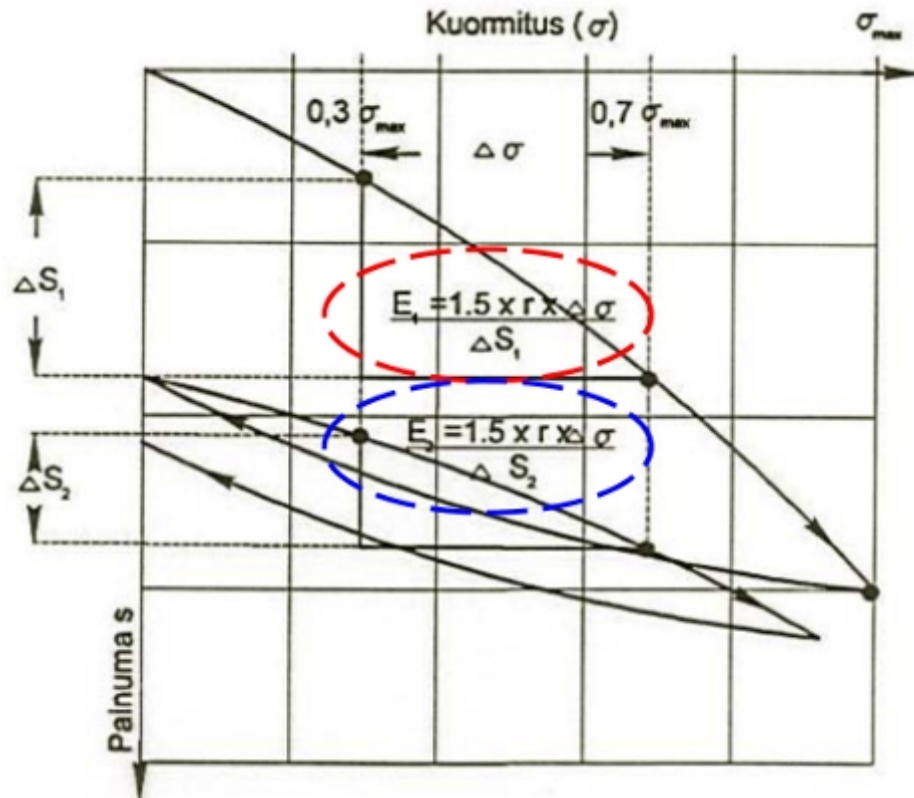
γ on mitattavan kerroksen kuivatilavuuspaino

$\gamma_{k,maks}$ on materiaalikohtainen maksimikuivatilavuuspaino

Parannetussa Proctor-kokeessa käytetty maa-ainesnäytteen sullontatyö vastaa nykyaikaisella tiivistämiskalustolla aikaan saatavaa tiukat vaatimukset täyttävää tiivistämistyötä. (Tielaitos 1990) Tiiviydenmittausmenetelmiin perehdytään tarkemmin kappaleessa 4.1. Suorat tiiviydenmittausmenetelmät.

Materiaaleilla, joille tavanomaiset tiiviydenmittauskokeet eivät sovellu, kuten karkearakeiset kalliomurskeet, rakenteen riittävän tiiviyden toteutumista valvotaan kantavuusmittauksin. Kantavuudella tarkoitetaan yleisesti mittaukseen käytettävän kuormituslevyn alla olevan rakenteen pinnalta mitattavaa kokonaisjäykkyyttä. Rakenteen oletetaan olevan riittävän tiivis kun tietty kantavuustaso, eli kokonaisjäykkyys, saavutetaan. Kantavuusmittaukset tehdään tyypillisesti levykuormituskokeella, jolla määritetään mitattavan kerroksen muodonmuutosmoduuli. Rakenteilta vaadittavat kantavuudet ilmoitetaan levykuormituskokeilla määritettyinä muodonmuutosmoduuliarvoina. Mikäli kerrosten tiiviyyttä tarkkaillaan muulla kuin edellä mainitulla menetelmällä, tulee niillä saatavien tulosten riippuvuussuhde osoittaa levykuormituskokeen tuloksiin, esim. pudotuspainolaitteen taipuma-arvo tulee redusoida kantavuusarvoksi. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Rakenteiden kantavuusvaatimukset esitetään levykuormituskokeella määritettävien ensimmäisen, E_1 , ja toisen, E_2 , kuormitusvaiheen muodonmuutosmoduulien suhteena E_2/E_1 , sekä toisesta kuormitusvaiheesta määritetyn muodonmuutosmoduulin yksittäisarvona.



Kuva 14: Muodonmuutosmoduulin E määrittäminen levykuormituskokeen kuormitus-painumakuvaajasta (InfraRYL 2006 päivitysversio 2009/1, LiiteK7)

Kuvassa 14 on esitetty muodonmuutosmoduulien E_1 ja E_2 määrittämisperiaate levykuormituskokeen kuormitus-painumakuvaajasta. Kantavuutta kuvaavat muodonmuutosmoduulit lasketaan kuormituslevyn koon, kuormitusvoiman ja levyn painuman avulla kaavalla

$$E = 1,5 * r * \frac{\Delta\sigma}{\Delta S}, \quad (4)$$

missä

r on kuormituslevyn säde

$\Delta\sigma$ on pintapaineen muutos

ΔS on painuman muutos. (Tielaitos 1990)

Kantavuusmittauslaitteiden toimintaperiaatteisiin perehdytään tarkemmin kappaleessa 4.2. Epäsuorat tiiviysmittausmenetelmät.

Maapenger

Maapenkereen tiivyttyä tarkkaillaan erikseen kunkin rakennettavan kerroksen päältä. Raiteen keskilinjalla tiiviysmittaukset tehdään 150 m välein, jokaisen raiteen kohdalta. Penkereen reunoilla mittaustiheys on 300 m, vuorotellen penkereen molemmiin puoliin. Mittaus tehdään 1 m etäisyydellä penkereen reunasta. Käytettäessä tiivistä-

miseen itsemittaavaa jyrää, voidaan kokeellisten tarkkailujen mittausväliä pidentää siten, että raiteiden keskilinjalla mittaukset tehdään 400 m ja reunoilla 800 m välein.

Taulukko 5: Penkereen tiiviysasteen ja levykuormitusmoduulien vaatimukset

Etäisyys radan kv:sta	Vaadittu tiiviysaste		E ₂ (MPa)	
	Keskimäärin	Vähintään	Keskimäärin	Vähintään
< 3,0m	92 %	90 %	120	100
> 3,0m	90 %	87 %	100	90

Sekä maa- että louhepenkereiltä edellytetään samoja tiiviys- ja kantavuusvaatimuksia, jotka on esitetty edellä taulukossa 5. Käytettäessä pengermateriaalina murskettua tai soraa tulee pengertäytteen tiiviys määrittää levykuormituskokeella. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tiiviyttä mitataan satunnaisesti 100 m välein kultakin raiteelta erikseen. Suodatinkerroksen tiiviysvaatimus parannetulla Proctor-kokeella määritetystä enimmäiskuivatilavuuspainon arvosta on keskimäärin ≥ 92 % ja pienin sallittu yksittäinen koetulos ≥ 90 %. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Eristyskerros

Eristyskerroksen tiiviystarkkailumittauksia tehdään jokaisesta levitettävästä ja tiivistettävästä kerroksesta erikseen. Rakenteen keskeltä mittaukset tehdään 100 m välein ja vastaavasti rakenteen reunoilta 300 m välein. Käytettäessä kerrosten tiivistämisessä itsemittaavaa jyrää voidaan kokeellisten tiiviysmittausten mittausväliä suurentaa siten, että rakenteen keskeltä mitataan 400 m ja reunoilta 800 m välein.

Rakennettaessa eristyskerros hiekasta tai sorasta, kerroksen tiivistymistä tarkkaillaan vesivolymetri- tai kantavuusmittauskokein. Tiiviyyden tulee jokaisessa tiivistettävässä kerroksessa saavuttaa 95 % tiiviysaste parannetulla Proctor-kokeella määritetystä enimmäiskuivatilavuuspainon arvosta. Yksittäisenkin mittaustuloksen tulee olla vähintään 92 % tiiviysasteessa.

Käytettäessä eristyskerrosmateriaalina kalliomurskettua, tehdään tiiviyyden tarkastusmittaukset kantavuusmittauksin. Kantavuutta voidaan tarkkailla levykuormituskokeella tai painopudotuslaitteella. Levykuormituskokeella määritettyjen muodonmuutosmoduulien suhteen tulee täyttää ehto

$$\frac{E_2}{E_1} \leq 3. \quad (5)$$

Lisäksi muodonmuutosmoduulin E₂ on oltava keskimäärin vähintään 160 MPa ja jokaisesta yksittäisessä mittauspisteessä saadun arvon vähintään 140 MPa. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Välikerros

Välikerroksen tiiviyden ja kantavuuden tarkkailumittauksia tehdään rakenteen keskilinjalta vähintään 100 m välein ja molemmilta reunoilta 300 m välein. Mikäli tiivistämiseen käytetään itsemittaavaa jyrää, kokeellinen tarkkailu voidaan tehdä keskilinjalta 400 m ja reunoilta 800 m välein. Kerroksen tiivistymistä tarkkaillaan volymetri- tai levykuormituskokeella. Karkeasta sorasta tai murskeesta tehdyn välikerroksen tiiviyyttä tulee tarkkailla työmenetelmätarkkailuna ja levykuormituskokeilla.

Tarkkailtaessa välikerroksen tiiviysvaatimuksia levykuormituskokeiden avulla tulee jokaisen yksittäisen mittaustuloksen moduuliarvojen suhteen täyttää vaatimus

$$\frac{E_2}{E_1} \leq 2. \quad (6)$$

Lisäksi levykuormituskokeella määritettävien muodonmuutosmoduulien E_2 keskiarvon on oltava vähintään 180 MN/m^2 ja yksittäisten E_2 arvojenkin on ylitettävä 150 MN/m^2 .

Käytettäessä tiiviyden tarkkailuun volymetriä, tulee välikerroksen pinnasta mitattujen kuivatilavuuspainojen keskiarvojen olla yli 95 % parannetulla Proctor-kokeella määritetystä maksimikuivatilavuuspainosta. Yksittäistenkin volymetrillä mitattujen kuivatilavuuspainoarvojen tulee olla vähintään 92 % tiiviysasteessa. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

2.4. Radan alusrakenteiden vaatimuksia naapurimaissa

Ruotsi

Ruotsissa Suomen välikerrosta vastaa "underballast" -kerroksen yläosa, joka rakennetaan raekooltaan alle 150 mm murskeesta, jossa raekokosuhteen C_U (kaava 2) tulee olla yli 6. Lisäksi kerroksessa käytettävälle materiaalille on määritetty ehtoja eri raekokolajitteiden painoprosenttien suhteille. Ruotsissa "underballast" -kerroksen yläosassa käytettävässä murskeessa sallitaan suuremmat hienoainespitoisuudet kuin Suomessa vastaavassa kerroksessa käytettävässä materiaalissa sallitaan. Eristyskerrosta vastaava kerros voidaan Ruotsissa tehdä joko kalliomurskeesta, soramurskeesta tai luonnonmateriaaleista, joiden maksimiraekoko on 150 mm ja raekokosuhte C_U (kaava 2) on suurempi kuin 6. Lisäksi materiaalin tulee täyttää vastaavat, eri seulakokojen läpäisyprosenttien suhteille määrätty vaatimukset kuin "underballast" -kerroksen yläosan materiaalin. (Banverket 2007, Saarisen 2008 mukaan)

Norja

Norjassa välikerrosta vastaavassa "forsterkningslag"-kerroksessa, jonka minimipaksuus on tyypillisesti 700 mm, käytettävän soran tulee olla luonnonmuodostumasta otettua suhteistunutta soraa, jonka maksimiraekoko on 150 mm. Käytettäessä materiaalina lou-

hetta tai mursketta tulee maksimiraekoon olla 300 mm tai enintään puolet rakennettavan kerroksen paksuudesta. Norjassa ei ole käytössä käytettäville materiaaleille erillisiä ohjerakeisuuskäyriä, eikä myöskään erillisiä valmiiden rakenteiden laadunmittausmenetelmiä, vaan siellä rakenteiden laatu varmistetaan työtapatarkkailuna. ”Forsterkningslag”-kerroksessa käytettävän materiaalin laadunvalvontatoimenpiteiksi ohjeistetaan visuaalista vastaanottotarkastusta, jossa tarkkaillaan materiaalin maksimikivikokoa ja maalajia sekä 2000 m³ välein tehdään rakeisuusmääritys, josta tarkastetaan maksimiraekoko ja hienoaineksen määrä. Tiivistystyön yhteydessä seurataan jokaisen tiivistettävän kerroksen paksuutta, materiaalien lajittuneisuutta, yliajokertojen määrää ja kerroksen kokonaispaksuutta. Rakennekerroksen valmiille pinnalle on annettu tietyt mittatoleranssit joiden sisällä valmiin pinnan tulee sijaita. Valmiin rakenteen pinta kartoitetaan 10 m välein kolmesta pisteestä, keskilinjalta ja 0,5 m molemmista reunoista. (Jernbaneverket 2009)

Venäjä

Venäjällä ratapenkereen rakennekerrosten tiiviysvaatimukset on esitetty hienojakoisemmille materiaaleille, kuten hiekalle ja savisille maalajeille. Tiiviyydet määritetään materiaalien maksimi kuivairtotiheyksien avulla, jotka määritetään standardisoidulla tiivistysmenetelmällä. Alusrakennetta vastaavan kerroksen yläosan, joka ulottuu korkeampiluokkaisilla radoilla 1 m syvyyteen ja alempiluokkaisilla 0,5 m syvyyteen rakenteen yläpinnasta, tiiviysvaatimukset ovat korkeampiluokkaisilla radoilla 98 % ja alempiluokkaisilla 95 %. Käytettäessä rakenteessa homogeenisia hiekkamaalajeja, tiiviysvaatimukset ovat 95 % ja 92 %. Alusrakenteen alaosassa, joka käsittää edellä mainittujen rajojen alapuolisen osan, tiiviysvaatimukset ovat korkeampiluokkaisilla radoilla 95 % ja alempiluokkaisilla 90 %. Korkeampiluokkaisilla radoilla tiiviysvaatimus on lisäksi 92 %, jos materiaali on homogeenista hiekkaa. Leikkauspohjalle, pohjamaalle ja pengerpohjalle 0,5 m syvyyteen on asetettu samat tiiviysvaatimukset kuin alusrakenteen yläosalle.

Rakennekerroksissa Venäjällä käytetään sekä murskattuja kiviainesmateriaaleja että luonnonmateriaaleja. Alusrakenteen yläosassa voidaan käyttää raekooltaan alle 200 mm murskattua kiviainesta, jos kerrospaksuus on yli 0,5 m ja rakenteen alemman kerrokset on myös rakennettu kiviainesmateriaaleista (rocky soil). Venäjänkielisestä tekstistä englanniksi käännetyn lähteen (Gosstroy of Russia. 1995.) mukaan, myös savimaa-ainesten (eng. clay soils) käyttö ratapenkereissä on mahdollista. Tässä tulee kuitenkin huomioida Venäjän maantieteellinen laajuus ja osittain sen erilaiset maaperäolosuhteet, jolloin savista puhuttaessa ei välttämättä tarkoiteta suomalaistyyppistä pehmeää savea. Muutenkin Venäjällä jaotellaan kiviainekset ja maalajit hyvin tarkasti niitä muokanneiden ilmastoloosuhteiden ja syntyperän perusteella. (Gosstroy of Russia 1995; Gosstroy of Russia 1998)

Saksa

Saksassa karkearakeisista maalajeista rakennettujen rautatierakenteiden tiiviyksiä ja kantavuuksia mitataan sekä levykuormituskokein että painopudotuslaitteella. Levy-

kuormituskokeiden painuma-arvoista lasketaan ensimmäisen ja toisen kuormitusvaiheen muodonmuutosmoduulit (saks. Verformungsmodul) samalla laskukaavalla (kaava 4) kuin suomessakin. Saksalaisissa ohjeissa on radan alusrakenteelta vaadittavat tiiviys- ja kantavuusarvot eritelty rataluokittain taulukon 6 mukaisesti. Valmiin alusrakenteen ja pohjamaan päältä mitattavalle levykuormituskokeen toisen kuormitusvaiheen muodonmuutosmoduulille E_{v2} on annettu minimiarvot, jotka tulee ylittyä jokaisessa mittauspisteessä. Kantavuusarvojen lisäksi rakenteelta ja pohjamaalta vaaditaan myös rataluokittain määritelty standardisoidulla Proctor-kokeella määritetty tiiviysaste taulukon 6 mukaisesti. Saksalaisessa ohjeessa tiiviyn määritykseen käytettävä Proctor-koe ei ole täysin sama kuin Suomessa käytettävä parannettu Proctor-koe. Saksalaisissa ohjeissa mainitussa Proctor-kokeessa maa-aineksen sullonnassa käytetään kevyempää vasaraa ja matalampaa pudotuskorkeutta kuin parannetussa Proctor-kokeessa käytetään. Tällöin Proctor-kokeella saatava tiiviyn vertailuarvo on saksalaisella menetelmällä jonkin verran pienempi kuin parannetulla Proctor-kokeella määritetty. Tämä selittää seuraavassa esitetyt tietyiltä rakenteilta vaadittavat yli 100 % tiiviysasteet. Näin ollen alla esitetyt D_{pr} tiiviysasteet eivät ole suoraan verrannollisia Suomessa käytettäviin tiiviysasteisiin.

Taulukko 6: Saksassa uusilta ja kunnossapidettäviltä radoilta vaadittavat tiiviysasteet D_{pr} ja levykuormituskokeella mitatun muodonmuutosmoduulin E_{v2} minimiarvot (Göbel et al 1996)

Rataluokka			Alusrakenteen päältä		Pohjamaan pinnalta	
			E_{v2}	D_{pr}	E_{v2}	D_{pr}
uudet raketit	pääraide päärautateilla		120	1,03	80	1,00
	pääraide kaupunkirautateilla (S-bahn) ja sivuraiteet		100	1,00	60	0,97
	muut raiteet		80	0,97	45	0,95
kunnossapidettävät	olemassa oleva rautatiereitti	$v > 160 \text{ km/h}$	80	0,97	45	0,95
		$v \leq 160 \text{ km/h}$	50	0,95	20	0,93

Teoksessa Der Eisenbahnunterbau (Göbel et al 1996) esitetään karkearakeisille maa-lajeille Proctor-kokeella määritettyjä tiiviysasteita vastaavat levykuormituskokeella määritetyt kantavuussuhteet seuraavasti:

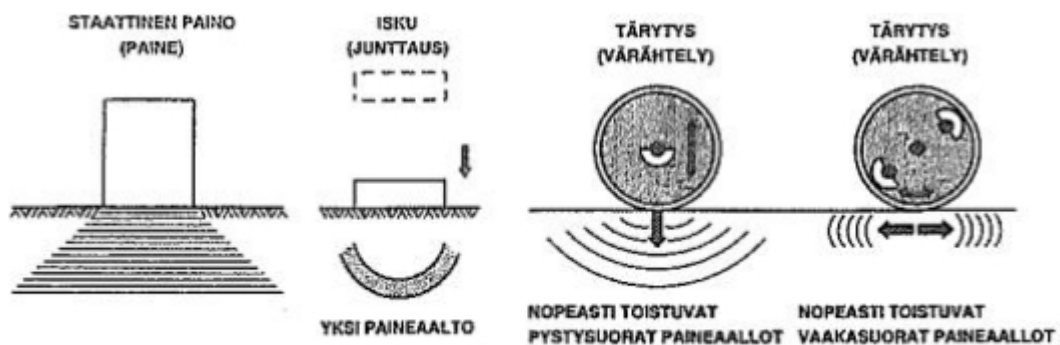
Tiiviysaste D_{pr}	maksimi E_{v2}/E_{v1}
100 %	2,3
97 %	2,5
95 %	2,6

Edellä esitettyjä levykuormituskokeella mitattuja kantavuussuhteita E_{v2}/E_{v1} käytetään raja-arvoina kun rakenteen tiiviyttä mitataan ainoastaan kantavuusmittauskokein.

3. TIIVISTYSKALUSTOT JA -MENETELMÄT

3.1. Tiivistyskalustot

Tiivistettäessä vähennetään maan huokostilavuutta ja samalla suurennetaan sen irtotiheyttä. Tiivistyminen saadaan aikaan siten, että maahiukkasten välisiä voimia, kuten sisäinen kitka ja koheesio, kumotaan ja saatetaan hiukkaset lähemmäksi toisiaan. Tiivistämisellä saadaan aikaan muun muassa maapohjan sekä maarakenteiden kantavuuden ja leikkauslujuuden lisääntymistä, valmiin rakenteen muodonmuutosten vähentymistä, vedenläpäisevyyden pienenemistä ja yleensä kestävyyttä säänvaihteluita vastaan. (Hartikainen 2002). Maarakenteiden tiivistämisessä käytettävien jyrrien tiivistämisvaikutus voidaan jakaa kahteen toimintaperiaatteeseen, dynaamiseen ja staattiseen, joissa tiivistysvaikutus saadaan aikaan neljällä eri tavalla (kuva 15). Dynaamisessa tiivistämisperiaatteessa tiivistämisvaikutus perustuu valssin painon ja tärinän yhteisvaikutukseen, kun taas staattisella toimintaperiaatteella tiivistyminen perustuu pelkästään valssin painoon. Valssin paino on molemmissa tapauksissa tärkein tiivistyskaluston valintaperuste, joten koneluokituksissa luokitusperusteena käytetään laitteen painoluokkaa. Tiivistystyössä tarvittavan valssin painoluokan määrittelee tiivistettävän materiaalin raekoon suuruus ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus.



Kuva 15: Tiivistysvaikutus saadaan aikaan neljällä eri tavalla (Hartikainen 2002)

Irtorakeiset luonnon maa-ainekset, kuten hiekka, sora, karkearakeiset moreenit ja murskatut kiviainekset ja louhe tiivistetään usein tärytiivistyksenä, jossa maassa leviävillä värähtelyillä on olennainen merkitys. Hienorakeiset maa-ainekset kuten savi ja siltti tiivistetään yleensä sullomalla, koska niissä rakeiden välinen koheesio estää rakeiden irtoamisen toisistaan tärymenetelmin. (Hakulinen 2009)

3.1.1. Staattinen tiivistyskalusto

Staattisten tiivistyskalustojen tiivistysvaikutus perustuu lähinnä tiivistävän kaluston oman painon aiheuttamaan pystysuoraan joustamattomaan puristukseen, paineeseen. Lisäksi kaluston liike aiheuttaa maarakeiden pääjännitysten kiertymistä, mikä helpottaa rakeiden irtoamista toisistaan ja uudelleen järjestymistä tiiviimpään tilaan. Tämä vaikutus kuitenkin pienenee jatkuvasti jyräyksen edetessä. Koska tiivistyskyky perustuu ainoastaan tiivistyskaluston painoon, niillä ei pystytä tiivistämään paksuja kerroksia kerralla. Viivapaine on, valssijyrien tiivistysvaikusta arvioitaessa, hyvin oleellinen tieto. Viivapaine ilmaisee jyrän painon valssin leveyttä kohti [kN/m]. Jokaisella valssilla on maalaajista ja valssin halkaisijasta riippuva viivapaineen raja-arvo, jonka ylityttyä tiivistettävän kerroksen pinta jää suomumaiseksi ja valssin eteen muodostuu maakasautumia, jolloin tiivistyminen on epätasaista.

Staattisia tiivistyskalustoja ovat sileävalssijyrät, kumipyöräjyrät ja sorkkajyrät. Radan rakentamisessa niitä ei juurikaan käytetä. Sorkkajyrät soveltuvat koheesiomaiden tiivistämiseen ja ovat näin ollen hyvä valinta esimerkiksi savisten ja silttisten pohjamaiden tiivistämiseen. Sorkkajyrät ovat kumipyörävetoisia valssijyriä, joiden valssissa on tiivistysvaikutusta lisääviä nystyröitä.



Kuva 16: Sorkkajyrä 3,4 t (Conplant Ammann Australia) ja staattinen valssijyrä (Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy)

Staattiset sileävalssijyrät soveltuvat parhaiten asfalttitöiden tekoon, sillä niillä saadaan erittäin tasaista ja tiivistä pintaa. Kesällä niitä voidaan käyttää lähinnä ohuiden (150..300 mm) kitkamaakerrosten tiivistämiseen, mutta niiden käyttö ratarakentamisessa on lähes olematonta heikon syvyysvaikutuksen takia. (Hartikainen 2002)

3.1.2. Dynaaminen tiivistyskalusto

Dynaamisen tiivistyskoneen tiivistysvaikutus perustuu koneen oman painon aiheuttaman pintapaineen ohella siihen, että koneesta välittyy maahan yleensä lähes pystysuorassa suunnassa dynaaminen värähdysliike ja isku. Värähdysliike ja isku aikaansaadaan lähes kaikissa käytettävissä tiivistyskoneissa epäkeskeisen voiman avulla. Tyypillisesti epäkesko on laakeroitu kiertämään valssin akselin ympäri. Täräyksen voima koostuu iskun suuruudesta ja sen taajuudesta. Useimmissa nykyaikaisissa tiivistyskalustoissa iskun

suuruutta (amplitudia) ja taajuutta pystytään säätämään. Pienemmällä amplitudilla epäkeskeinen voiman on pienempi, mutta taajuus tyypillisesti suurempi ja suuremmalla amplitudilla vastaavasti epäkeskeinen voima on suurempi, mutta taajuus alhaisempi. Taajuus ja amplitudi vaikuttavat suoraan tiivistyvän kerroksen paksuuteen, mitä suurempi amplitudi on, sitä parempi tiivistysteho saavutetaan. Suuren amplitudin haittapuolena on kuitenkin pintakerroksen löyhtyminen, joten paras tiivistystulos saavutetaan kun aluksi jyrätään suurella amplitudilla ja viimeiset ylityskerrat pienellä amplitudilla, jolloin myös pintarakeet saadaan tiiviiksi. Yleensä tärykoneiden sopiva amplitudi on hiekkalla ja soralla 0,8–1,2 mm, mutta syvätiivistyksessä voidaan käyttää 1,5–2,0 mm amplitudia. (Hakulinen 2009; Hartikainen 2002; Ryyänen et al 1994)

Maa tiivistyy, kun pystysuuntaiset puristusaalot sysäävät rakeet liikkeelle ja poikisuuntaiset leikkausaalot järjestävät rakeet uudelleen tiiviimpään tilaan. Näiden lisäksi tiivistymiseen vaikuttaa oleellisesti, myös tärytiivistyksessä, staattinen sullonta. Sullonnan tehon vaikutusta lisää tiivistyskaluston liikkuminen, jolloin maarakeiden pääjännitykset ovat jatkuvassa kiertoliikkeessä ja rakeet irtoavat helpommin toisistaan ja asettuvat tiiviimpään tilaan. Ajonopeuden suuruus vaikuttaa oleellisesti myös pintakerroksen vaakasiirtymiin, jolla lienee merkitystä pintakerroksen hienonemiselle, jos kiviaines on helposti hioutuvaa. (Hakulinen 2009; Ryyänen et al 1994)

Tärylaitteen aiheuttaman iskun suuruus on suurimmillaan resonanssitilanteessa, jossa täryn taajuus on sama kuin täryrummun ja maan yhteinen ominaistaajuus. Tällöin myös tiivistysvaikutus on parhaimmillaan. Maan tiivistyessä sen jäykkyys kasvaa ja mahdollistaa resonanssitilan kehittymisen. Resonanssissa iskun suuruus voi kuitenkin kasvaa merkittävästi ja valssi ajoittain irrota maasta. Valssin hyppiminen on epäsäännöllistä ja maanpinnalla voimistuva isku voi rikkoa jo tiivistetyn maan rakenteen. Tällöin tapahtuu niin sanottua ylitiivistymistä eli löyhtymistä ja erityisesti heikoilla kiviaineksilla maan hienonemista. Liiallinen tiivistäminen myös rikkoo kiviainesrakeita ja tämän seurauksena materiaalin rakeisuus ja kantavuusarvo muuttuvat, usein alkuperäistä huonommaksi (Tielaitos 1990). Liiallisesta jyräyksestä mahdollisesti aiheutuvaa kiviaineksen rikkoutumista tarkkaillaan silmämääräisellä tarkastelulla.

Perinteisten tärylaitteiden ympäristölle aiheuttamien värinähaittojen vähentämiseksi on kehitetty suuntaavia (oskilloivia) tiivistyskalustoja. Oskilloivassa jyrässä on kaksi täryakselia, jotka on laakeroitu valssin pätyyn sen vastakkaisille reunoille. Epäkeskot pyörivät samalla nopeudella siten, että ne ovat aina vastakkaisilla puolilla, jolloin liike saa aikaan voimaparin, joka pyrkii pyörittämään valssin kehää vuoroin eteen ja taaksepäin. Perinteisen täryjyrän toiminta perustuu iskuvaikutukseen, kun taas oskilloivaa jyrää käytettäessä tiivistettävään kerrokseen syntyy pystysuuntaisten, omasta painosta aiheutuvien, voimien lisäksi vaakasuuntaisia leikkausvoimia (kuva 15). Oskilloivia jyriä käytettäessä hienoneminen lienee ainakin kovilla ja hauraila kiviaineksilla vähäisempää kuin täryjyrällä tiivistettäessä (Ryyänen et al 1994). Mittausten perusteella oskilloivien jyrien aiheuttama värinä ympäristössä on perinteisten täryjyrien aiheuttamaa värinää pienempi. (Hakulinen 2009; Ryyänen et al 1994)

1-valssiset täryjyrät

1-valssiset täryjyrät ovat tyypillisesti kumipyörävetoisia täryjyriä, joissa on valssi etu-akselissa ja vetävät kumipyörät taka-akselissa. Omalla moottorivoimalla kulkevat täryjyrät ovat yleensä aina runko-ohjattuja, joten kumipyörien ansiosta jyrän ohjattavuus on hyvä, mutta maan tiivistäminen jää pelkästään valssin varaan. Kumipyörävetoiset täryjyrät ovat varmoja yleiskoneita kaikissa kitkamaiden tiivistämistöissä. Itsekulkevat jyrät ovat ahtaissa paikoissa huomattavasti vedettäviä jyriä käyttökelpoisempia ja niillä päästään tiivistämään hyvin lähelle sivuesteitä. Kaikkia jyriä pystytään ajamaan myös ilman täryä, joten täryjyrät ovat lähes täysin syrjäyttäneet puhtaasti staattisten jyrien käytön. (Hartikainen 2002; Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy)



Kuva 17: Yksivalssinen kumipyörävetoinen täryjyrä 14 t (Conplant Ammann Australia)

Kaksoisvalssijyrät

Kaksoisvalssijyrässä sekä etu- että taka-akselissa on valssit, joista tyypillisesti molemmat toimivat vetävinä. Tällaiset jyrät soveltuvat hyvin töihin, missä tasainen ja sileä loppupinta on tärkeä, joten esimerkiksi asfalttityöt sekä urheilukenttien rakennustyöt ovat tyypillisimpiä käyttökohteita. Kaksoisvalssijyrät ovat kuitenkin käyttökelpoisia myös kitkamaalajien tiivistämisessä ja niillä päästään hieman suurempiin työsaavutuksiin kuin 1-valssisilla täryjyrillä juuri kahden täryttävän valssin ansiosta. (Hartikainen 2002; Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy 2008)



Kuva 18: Kaksoisvalssijyrä 3,9 t (KH-Koneet Oy)

Vedettävät tärjyjrät

Vedettävät tärjyjrät ovat ajoneuvon tai jonkin työkoneen perässä vedettäviä, yhdellä valssilla varustettuja jyriä. Ne soveltuvat maantiivistystöihin siinä kuin muutkin tärjyjrät, mutta valssin suuren painon vuoksi vetolaitteeksi tarvitaan riittävän tehokasta kalustoa. Vedettävien tärjyjrien käyttö on nykyään lähes olematonta, johtuen niiden hankalasta käsiteltävyydestä ahtaissa paikoissa ja niiden rajoittuvuus vain yhteen suuntaan kulkevina. (Hartikainen 2002; Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy 2008)



Kuva 19: Vedettävä tärjyjä (Hartikainen 2002)

Tärylevy

Käsin ajettavat tärylevyt ovat myös tärkeitä tiivistysvälineitä kaikissa maarakennustöissä. Tärylevyt soveltuvat parhaiten kitkamaalajien tiivistykseen pienissä työkohteissa, kapeilla käytävillä, johto- ja putkikaivannoissa sekä muissa vastaavissa ahtaissa paikoissa. Järeämmät, 200..500 kg tärylevyt sopivat hyvin esimerkiksi anturapohjien sekä vierustäyttöjen, kuten siltojen taustatäytöt, tiivistämiseen ja kevyet, alle 100 kg tärylevyt esimerkiksi salaojitustöihin.



Kuva 20: Kahteen suuntaan kulkeva tärylevy 0,5 t (KH-Koneet Oy)

Täryenergia siirretään maapohjaan värähtelevän pohjalevyn avulla. Täryliike on suunnattu, joten pinta löyhtyy vähän ja syvyysvaikutus on suuri. Sama suunnattu täryliike toimii koneen eteen- tai taaksepäin vievänä voimana. Alle 500 kg tärylevyillä, hiekkaa ja soraa voidaan tiivistää 200–300 mm kerroksina ja suuremmilla, alle 800 kg tärylevyillä, tiivistyssyvyys ulottuu aina 400–500 mm asti. (Hartikainen 2002; Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy 2008)

3.2. Tiivistysmenetelmät

Riittävän tiiviyn saavuttamiseksi tulisi tiivistyskalusto valita kuhunkin tarkoitukseen parhaiten soveltuvaksi. Radan alusrakenteen kitkamaalajien tiivistämiseen soveltuvat parhaiten erikokoiset täryjyrät ja muut dynaamiset tiivistyskoneet. Käytännössä ratarakentamisessa tyypillisesti käytettävien 0,5 m kerrospaksuuksien tiivistämiseen soveltuvat parhaiten yli 10 t yksivalssiset täryjyrät. Staattisia tiivistyskoneita kuten sileävalssi- ja kumipyöräjiä käytetään ratarakentamisessa vain erityistapauksissa. Myös koneiden yhdistelmiä voidaan käyttää. Tiivistys tehdään mahdollisimman raskaalla jyrällä. Suositeltavaa on käyttää suurissa täyttökohteissa puskulevyllistä raskasta kumipyöräjyriä, joka levittää ja tiivistää materiaalin samanaikaisesti. Tiivistetyn materiaalin löyhtymistä liioilla tiivistämiskerroilla tulee välttää. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus riippuu tiivistettävän materiaalin laadusta ja käytettävästä tiivistyskalustosta. Jokainen tiivistettävä kerros tiivistetään koko leveydeltään käyttäen kerrospaksuuden mukaan kuhunkin tarkoitukseen soveltuvaa tiivistyskalustoa ja tiivistyskertamäärää. Parhaaseen tiivistystulokseen päästään, kun tiivistettävän kerroksen vesipitoisuus on lähellä sen materiaaliakohtaista optimivesipitoisuutta. Tämän takia maalajin optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino määritetään ennen tiivistämistä. Tarvittaessa kerrokseen lisätään vettä optimivesipitoisuuden saavuttamiseksi. Vesi lisätään niin, että se jakautuu tasaisesti tiivistettävälle alueelle. Ratapenkereessä tiivistettävän materiaalin vesipitoisuus saa tiivistettäessä poiketa optimiarvosta enintään 2 %. (InfraRYL 2006 päivitysversio 2009/1)

Ohjeelliset tiivistyskertamäärät eri kalustoilla ja kerrospaksuuksilla tiivistettäessä on esitetty taulukossa 6. Sopiva kerrospaksuus ja tiivistystapa on kuitenkin suurempimittakaavaisessa tiivistystyössä syytä selvittää koetiivistyksellä. Koetiivistyksellä määritetään käytettävälle materiaalille, vallitsevissa olosuhteissa, kyseisellä kalustolla vaadittavaan tiiviyteen tarvittavat ylityskerrat. Koetiivistys tulisi tehdä samanlaisissa olosuhteissa ja samassa mittakaavassa kuin rakennettava kohde on. Mahdollisuuksien mukaan koetiivistyspengeri voidaan rakentaa osana tulevaa pengertä. Koetiivistyksen toteutus suunnitelman periaate on esitetty liitteessä 3. Tiivistystyössä noudatetaan koetiivistyksellä määritettyä tai taulukon 6 mukaista tiivistyskertamäärää.

Taulukko 7: Tiivistyskoneiden ohjeellinen jyräyskertamäärä eri kerrospaksuuksilla maa-aineksen ollessa lähellä optimivesipitoisuutta (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

Jyrätyyppi	Paino, t	Ylityskertojen ohjearvo							
		Suodatin-/eristyskerros		Välikerros		Louhe		Radan penguertäyte	
Kerrospaksuus enintään, m		0,25	0,5	0,25	0,3	0,8	1,0	0,4	0,8
Täryjyrät ²⁾									
– vedettävät	>5	4	7	5	8	6 ¹²⁾	7 ¹²⁾	5	5 ¹²⁾
– 2 täryvalssia	>5	3	4	3	5	-	-	-	-
– 1 täryvalssi	>5	4	7	5	8	5 ¹³⁾	7 ¹³⁾	5	5 ¹³⁾
Kumipyöräjyrät ³⁾	<20 ⁴⁾	6	-	8	-	-	-	-	-
	>20 ⁵⁾	4	8	6	12	-	-	10	-
Staattiset valssijyrät	>10	-	-	-	-	-	-	-	-
Pyöräkuormaajat	>40	-	-	-	-	-	-	-	-
Puskutraktorit	>10	-	-	-	-	-	-	-	-
Sorkkajyrät	7..10	-	-	-	-	-	-	-	-
Tärylevyt	>0,05	6	-	7	-	-	-	-	-
	>0,1	5	-	6	-	-	-	-	-
	>0,2	4	-	5	-	-	-	-	-
	>0,4	3	-	4	-	-	-	-	-

⁴⁾ Pyöräpaino > 2t, ⁵⁾ Pyöräpaino > 3t, ¹²⁾ Paino vähintään 8t, ¹³⁾ Paino vähintään 13t

4. TIIVIYDEN LAADUNVARMISTUSKALUSTOT JA -MENETELMÄT

4.1. Suorat tiiviyydenmittausmenetelmät

Tarkkailtaessa rakennekerrosten vaatimustenmukaisuutta kokeellisin menetelmin, tulisi rakenteen vaatimustenmukaisuus selvittää ensisijaisesti mittaamalla sen tiiviyyttä. Yleisesti käytettäviä suoria tiiviyydenmittausmenetelmiä ovat radiometriseen mittaukseen perustuvat säteilymittauslaitteet, joista yleisimpänä Troxler, sekä vesi- ja hiekkavolymetrit. Suorilla tiiviyydenmittausmenetelmillä mitattavan kerroksen tiiviyyttä verrataan materiaalin kuivairtotiheyden maksimiarvoon, joka on määritetty laboratorioolosuhteissa, tyypillisesti parannetulla Proctor- kokeella. Kentällä tarkasteltavan kerroksen tiiviys määritetään hieman eri tavoin mittausmenetelmästä riippuen. Näihin perehdytään seuraavissa kappaleissa.

Mikäli suorat tiiviyydenmittausmenetelmät eivät ole käyttökelpoisia, kuten hyvin karkeissa maalajeissa, joissa on 16 mm raekokolajitetta enemmän kuin 30 % tai kalliomurskeissa, varmistetaan rakenteen laatu kantavuuden lisäykseen perustuvien menetelmin. Karkeista materiaaleista rakennettujen kerrosten tiiviyyden määrittäminen kanta-
vuusmittausmenetelmin sillä suorilla tiiviyydenmittausmenetelmillä ei saavuteta riittävän luotettavia tuloksia karkeissa materiaaleissa tai niiden työsaavutukset karkeissa materiaaleissa eivät ole riittäviä. Kantavuusmittausmenetelmiin ja niillä saatujen kantavuusarvojen käytettävyyteen tiiviyyden arvioimisessa perehdytään luvussa 4.2.

4.1.1. Volymetrit

Volymetreillä maakerroksen tiiviyyttä määritetään tiivistetystä kerroksesta otetun näytteen tilavuuden ja massan avulla. Tarkasteltavaan kohtaan kaivetaan noin 1 litran suuruinen kuoppa, jonka tilavuus mitataan volymetrillä (kuva 21). Kuoppaa kaivettaessa irtaantunut materiaali otetaan tarkoin talteen. Saatu näyte punnitaan märkänä, aineksen vesipitoisuuden määrittämiseksi. Näyte kuivataan ja punnitaan uudelleen kuivana. Kuivairtotiheys saadaan jakamalla kuivan aineksen massa kuopan tilavuudella ja vesipitoisuus näytteen vesimäärään ja kuivan näytteen painon suhteena, eli

$$w_k = 100 \cdot \frac{m_m - m_k}{m_k}, \quad (7)$$

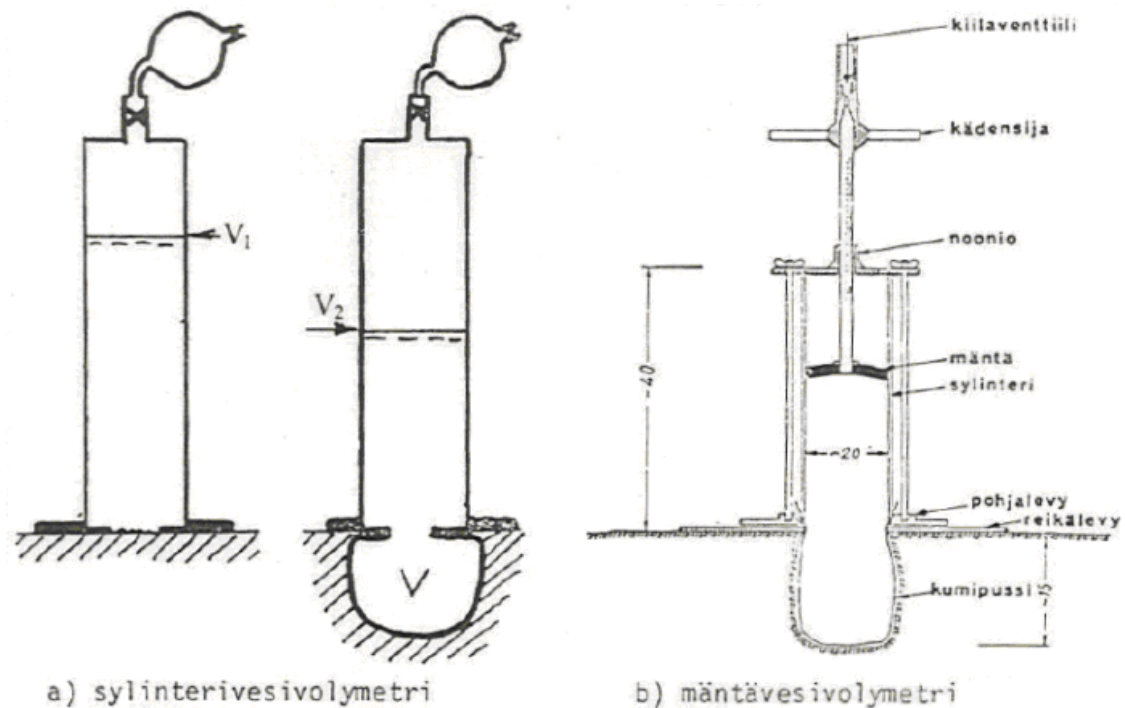
missä

w_k on vesipitoisuus massaprosenttina kuivapainosta,

m_m on näytteen märkápaino

m_k on näytteen kuivapaino

Volymetrikokeen suoritus on esitetty tarkemmin liitteessä 2. Määritettyä kuivatilavuuspainoa verrataan parannetulla Proctor-kokeella samasta materiaalista määritettyyn maksimiarvoon, jolloin saadaan määritettyä tiivistetyn maa-aineksen tiiviysaste. (Tielaitos 1990)



Kuva 21: Vesivolymetrin toimintaperiaate tiiviiden mittauksessa (Jääskeläinen et al 2009)

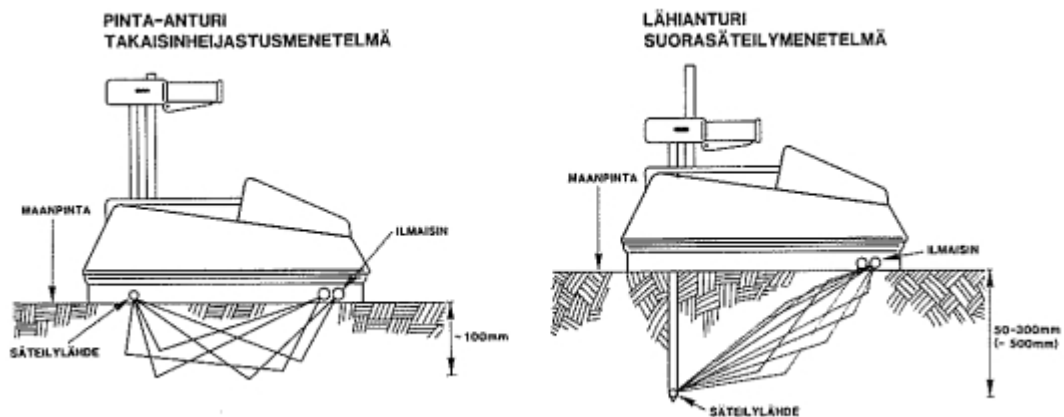
Volymetrilaitteita on kahta erilaista tyyppiä, vesi- ja hiekkavolymetri, joiden nimi kertoo tilavuuden määrittämiseen käytettävän aineen. Sekä vesi- että hiekkavolymetrissä laitteet ja kokeen kulku toimivat pääperiaattein samalla tavalla.

4.1.2. Säteilymittauslaitteet

Säteilymittauslaitteita, esimerkiksi Troxler, käytetään maakerrosten irtotiheyden ja kosteuspitoisuuden mittaukseen. Säteilylaitteilla tehtävä radiometrinen irtotiheyden ja vesipitoisuuden mittausmenetelmä perustuu maan läpi kulkevan, laitteesta lähtevän ionisoivan säteilyn vaimenemiseen. Maan irtotiheyden mittaus perustuu gammasäteilyn absorptioon ja sirontaan säteilyn kulkiessa maakerroksen läpi. Säteilylähteestä ilmaisimeen tulevan gammasäteilyn määrä on kääntäen verrannollinen maan tiiviyteen. Vesipitoisuuden mittaus taas perustuu siihen, että nopeat neutronit menettävät osan liike-energiastaan ja muuttuvat hitaiksi neutroneiksi, kun ne törmäävät maassa oleviin vetyatomien ytimiin. Neutronien hidastuminen on siis suhteessa maan sisältämien vetyatomien määrään ja samalla maan vesipitoisuuteen.

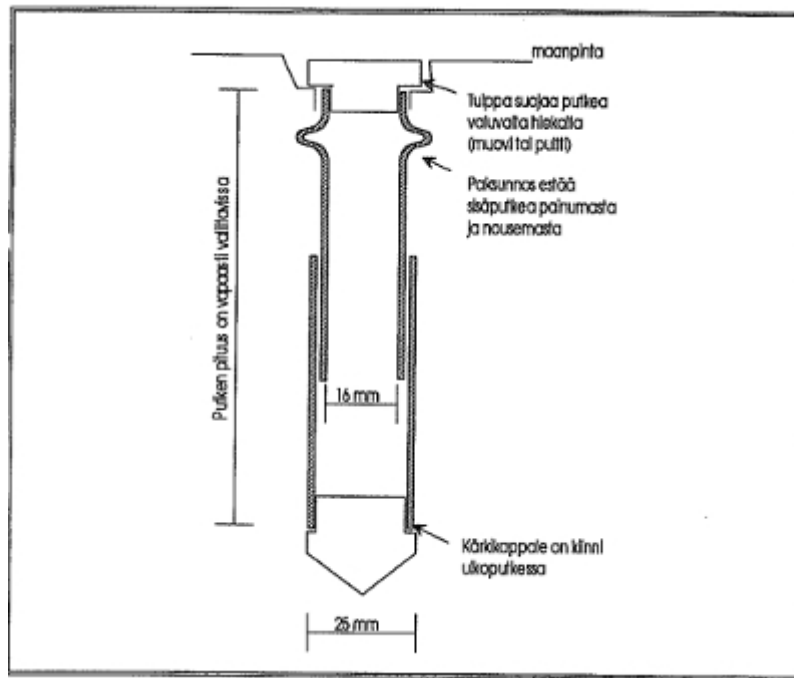
Radiometrisiä antureita ja myös mittausmenetelmiä on kolmea eri tyyppiä, takaisinsironta, suora säteilymittaus ja syvyysanturimittaus. Takaisinsironta, eli heijastusmittaukseen ja suorasäteilymittaukseen, jolloin mittaussyvyys on säädettävissä (kuva 22), voidaan käyttää samaa laitetta. Syvyysanturimittaus soveltuu mielivaltaisessa syvyydessä sijaitsevan kerroksen ominaisuuksien tutkimiseen ja toimii parhaiten pysyvissä mitauspisteissä, eikä näin ollen ole kovin käyttökelpoinen tiivistystyön valvonnassa. Seuraavissa käsitelläänkin vain takaisinsironta- ja suorasäteilymittausmenetelmiä. Säteilymittauslaite kalibroidaan ennen mittauksen aloitusta niin, että sillä saatavat tulokset voidaan muuntaa vastaamaan samasta materiaalista tehdyn parannetun Proctor-kokeen tavoitettavuutta. (Hartikainen 2002)

Mittaukset tulisi tehdä mahdollisimman hyvin tasatulta pinnalta, jotta mahdolliset laitteen ja maanpinnan väliset epätasaisuudet eivät aiheuta häiriöitä tiheys- ja vesipitoisuusarvojen määrittämisessä. Suoramittausta varten säteilyanturille tehdään maahan reikä tai havaintoja seurataan tiettyjen ylityskertojen jälkeen ennen tiivistystä kerrokseen asennetusta mittausputkesta, kuva 23. Mittausten tuloksia verrataan kalibrointilaitteissa saavutettuun tulokseen ja/tai koejyräyksen yhteydessä säteilymittauslaitteella määritettyihin kuivatiheyksiin. Suorasäteilymittausmenetelmällä saadut tulokset riippuvat voimakkaasti mittaussyvyydestä. Tuloksissa esiintyvä hajonta johtuu pääasiassa mittauspisteiden rakeisuuden vaihteluista. (Tielaitos 1993)



Kuva 22: Radiometrisen tiiviysmittauksen periaate (Hartikainen 2002)

Tielaitoksen julkaisun Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset (Tielaitos 1993) mukaan säteilymittauslaitteet soveltuvat käytettäväksi kerrosten tiiviysmittaukseen. Nykyään rakenteiden tiiviysmittaukset tehdäänkin käytännössä aina säteilymittauslaitteilla. Säteilymittauslaitetta voidaan käyttää myös kosteuspitoisuuden mittauksissa ja kosteuden optimointiin ennen kerroksen tiivistämistä (Tielaitos 1993).



Kuva 23: Poikkileikkaus säteilymittauslaitteen lähdeanturin suojaputkesta (Ryynänen et al 1993)

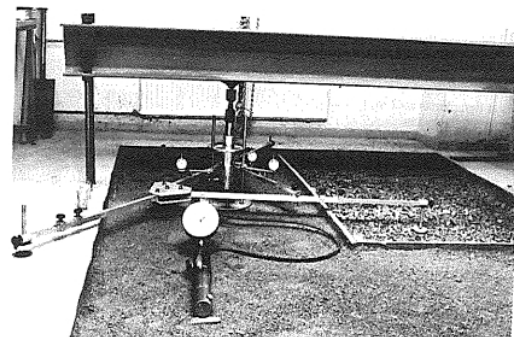
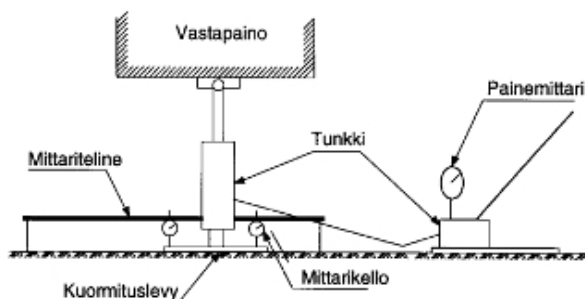
Pinta- eli heijastusmittauksella saadaan maan tiiviys ja vesipitoisuus selvitettyä nopeasti ja maan rakennetta rikkomatta. Saadut tulokset kuvaavat kuivatiheyttä kuitenkin vain kerroksen pinnalla, noin 100 mm syvyydessä. Kerroksen pohjalla kuivatiheys on kuitenkin pinta-arvoja pienempi. Rakennekerrosten tiiviiden mittaamiseen tulisikin ensisijaisesti käyttää suoraa säteilymittausta, jolla saadaan mitattua rakenteen tiiviyttä myös pintakerrosta syvemältä. Säteilymittauslaitteilla tehtävissä tiiviidenmittauksissa inhimillisistä tekijöistä johtuvat virhemahdollisuudet eliminoiduvat ja saadut mittatulokset ovat vähintään yhtä tarkkoja kuin muilla tavoilla määritetyt, mikäli materiaali on homogeenista. Jos tutkittavat maakerrokset ovat sen sijaan epähomogeenisia ja sisältävät suurehkoja kiviä, kerrosrajoja, vieraita mineraaleja, humusta tai muuta vastaavaa, mittaustuloksissa esiintyy paljon hajontaa. Tiiviiden ja vesipitoisuuden radiometriset mittausrakenteet eivät suoraan mittaa haettuja suureita, vaan nämä saadaan rekisteröityjen impulssien avulla kokemuseräisistä kalibrointikäyristä, jotka on valmiiksi ohjelmoitu mittalaitteeseen. Laite tekee automaattisesti tarvittavat laskutoimitukset ja mittalaitteen näytöllä näkyy käyttäjälle suoraan mitattavan kerroksen märkätiheys, kuivatiheys, kosteus, kosteusprosentti, tyhjätilan prosenttiosuus ja suhteellinen tiiviysprosentti. Jotta mittalaite laskisi edellä mainitut arvot oikein, tulee tutkittavan kerroksen maa-aineksen maksimikuivavirtotiheys ja optimivesipitoisuusarvot syöttää laitteeseen. Jotta laitteilla saataisiin luotettavia mittaustuloksia, on erittäin tärkeää kalibroida ne nimenomaan käyttöolosuhteissa. (Hartikainen 2002; Tielaitos 1993; Troxler Canada West Inc 2010)

4.2. Epäsuorat tiiviidenmittausmenetelmät

Määritettäessä karkearakeisten maalajien, joissa on 16 mm raekokolajitetta enemmän kuin 30 %, tai kalliomurskeiden tiiviyksiä, varmistetaan rakenteen laatu kantavuusmittausmenetelmin tai työtapatarkkailuna. Määritettäessä rakenteen tiiviyttä kantavuusmittausmenetelmin, rakenteelta mitattujen kantavuusarvojen tulee ylittää ennalta määritetyt ohjearvot, jolloin rakenteen voidaan olettaa olevan riittävän tiivis. Mitä pienempi muodonmuutos rakenteessa syntyy kuormituksen seurauksena, sitä suurempi kantavuus on saavutettu. Suurta kantavuutta pidetään yleensä merkinä lisääntyneestä tiiviydestä (Hartikainen 2002). Radan alusrakenteen eri kerroksilta vaadittavat, voimassa olevat kantavuusarvot on määritetty InfraRYL 2006 päivitysversion 2009/1, sekä tämän työn kappaleessa 2.3.2.

4.2.1. Levykuormituskoe

Levykuormituskokeella tutkitaan staattisen kuorman aiheuttamaa pinnan taipumaa ja kerrosten tiivistymistä, joiden avulla selvitetään rakenteen kantavuutta ja tiiviyttä. Mitattavaa kerrosta kuormitetaan pyöreänmuotoisen teräslevyn välityksellä käyttäen tietyn suuruisia kuormituksia. Kantavuutta kuvaavat arvot lasketaan levyn painuman sekä kuormituksen perusteella. (Tielaitos 1990) Kantavuuden laskentakaava levykuormituskokeen tuloksista on esitetty luvussa 2.3.2.

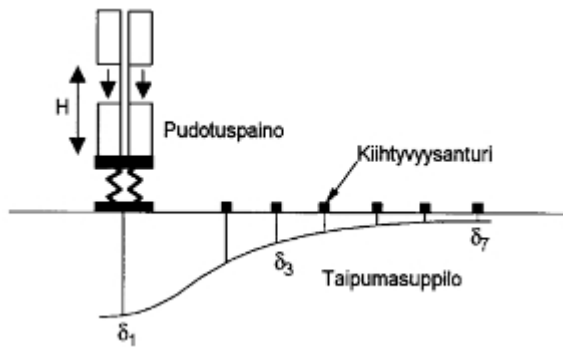


Kuva 24: Levykuormituslaite (Ehrola 1996) ja laite laboratoriossa (Hartikainen 2002)

4.2.2. Pudotuspainolaite

Pudotuspainolaitteella mitataan dynaamischen kuorman aiheuttama pinnensmaximalverschiebung und die Form der Verschiebung. An der Vorrichtung angeschlossene Sensoren messen die Verschiebung an verschiedenen Abständen von der Lastplatte. Die Tragfähigkeitswerte werden anhand der gemessenen Verschiebungen einzeln bestimmt.

Die Verschiebung, die durch die Lastung verursacht wird, d.h. die Verschiebung des Bodens, hängt von der gesamten Struktur, dem Fundament und den Schichten ab. Die Eigenschaften des Fundaments beeinflussen die Verschiebung der gesamten Verschiebungsbereichs und insbesondere die Verschiebung der Lastplatte. Die Verschiebung der Lastplatte wird an der Verschiebung der gesamten Struktur gemessen.



Kuva 25: Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate (Ehrola 1996)

Rakennekerrosten ominaisuudet vaikuttavat taipumasuppilon muotoon siten, että mitä lähempänä kerros on antureiden tasoa, sitä vähäisempi sen vaikutus taipumaan on kun etäisyys kuormituslevystä kasvaa. Muodonmuutoksiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa kerrosten rakeisuus, hienoainespitoisuus, vesipitoisuus ja tiiviys. Taipumien perusteella voidaan laskea koko rakenteen E-moduuli ja muita arvoja kuten niin sanottu pintamoduuli. Takaisinlaskentamenetelmillä voidaan arvioida myös eri rakennekerrosten moduuliarvoja. Taipumasuppilon perusteella voidaan arvioida myös rakenteeseen syntyviä jännityksiä ja muodonmuutoksia, joiden avulla voidaan ennustaa rakenteen kuormituskestävyyttä. (Tielaitos 1993)

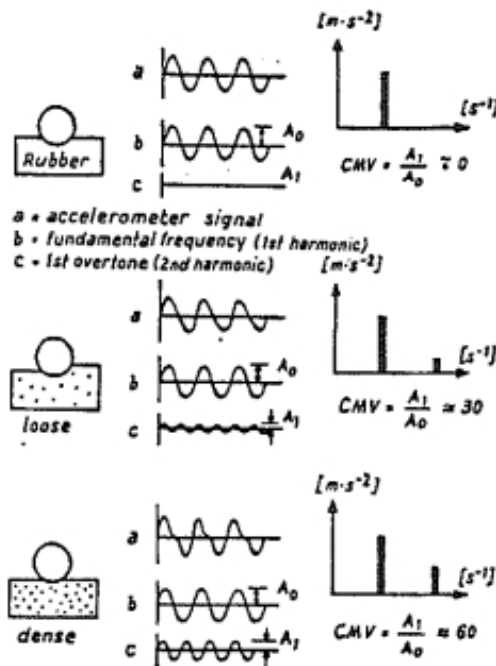
4.2.3. Itsemittaavat jyrät

Itsemittaavalla jyrällä, eli täryjyrällä jonka valssin liikkuvaan osaan on asennettu sen liikkeitä mittaava sensori, voidaan arvioida työalueen tiivistystulosta ja sen tasalaatuisuutta sekä kohdistaa luotettavammin muut tarkemmat tiiviyden mittaukset. Täryn aiheuttamaa signaalia käsitellään keskusyksikössä ja tulos näytetään tiivistysarvona, joka kasvaa alustan jäykkyyden kasvaessa.

Jyrän tiiviysmittarin arvon katsotaan kuvaavan kitkamaan suhteellista tiiviyttä ja alempien kerrosten kimmoisuutta. Jyrien tiiviysmittareilla saatavat arvot on syytä kalibroida tiivistystyön alussa vertaamalla jyrän mittarien tiiviyсарvoja perinteisemmällä menetelmällä, esimerkiksi volymetrillä, saatuihin tiiviyksiin. Oskilloivan jyrän mittarin näyttämiin arvoihin pohjamaan laatu vaikuttaa vähemmän, eli lukema kuvaa enemmän tiivistettävän kerroksen tiiviyttä. Itsemittaavien jyrien käyttö tiivistämisessä antaa mahdollisuuden suorittaa tiiviyksmittauksia jatkuvasti ja ilman tiivistetyn rakenteen rikkomista. Työn lopettamisesta voidaan päättää nopeasti ja luotettavasti, eikä tiivistyskertoja tule liikaa tai liian vähän. Tiivistystyön eteneminen on jouhevampaa, kun tiivistystyötä ei tarvitse keskeyttää mittausten ajaksi. (Hartikainen 2002; Ryynänen et al 1993)

Täryjyrän valssin ollessa täysin kimmoisella alustalla on sen värähtelyliike sini-käyrän muotoista. Valssin dynaamisen käyttäytymiseen vaikuttaa jyrän perustaaajuus ja maaperän kimmoisuus. Kiinteässä yhteydessä valssiin oleva kiihtyvyyssanturi rekisteröi jatkuvasti värähtelystä johtuvaa kiihtyvyyden pystysuoraa komponenttia. Maan tiivistyessä tärylaitteen liikkeen amplitudi (siirtymä) kasvaa, mikä merkitsee myös sen kiihtyvyyden kasvua. Alkujaan harmoninen siniaalto vääristyy maaperän vastuksen mukaan.

Värähtelystä erotetaan perustaajuuksien kerrannaiset, eli ylitaajuudet. Ensimmäinen ylitaajuus kuvastaa maaperän värähtelyä ja seuraaviin ylitaajuuksiin vaikuttaa muun muassa laakeriäänet ja riittämättömästi vaimennetut jyrän osat (Ryynänen et al 1993). Suo-
dattamalla selvitetävän perustaajuuden ja sen ensimmäisen yllään amplitudien suhteita laskemalla, saadaan laskettua tiiviystilaa kuvaava luku, kuvassa 26 CMV arvo.



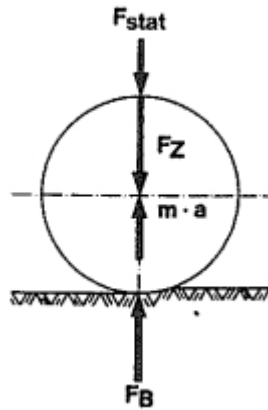
Kuva 26: Compactometer- laitteen käyttämän tiiviystilan määrittämisen toimintaperiaate (Floss et al 1983)

Tärylaitteen kiihtyvyyden perusteella voidaan arvioida maan tiiviyttä. Koska laitteen kiihtyvyyteen vaikuttaa koko dynaaminen systeemi, joka käsittää tiivistettävän maarakenteen lisäksi myös maarakenteen alapuoliset maakerrokset ja myös ympäristön maakerrokset vaihteluineen sekä laitteen rakenteen, ei kiihtyvyyden perusteella voi yksikäsitteisesti määrittää tiiviyyden laatua ja työn onnistumista. Kun laite on kulunut, voi tavanomaisessakin käytössä ilmenevien niin sanottujen toisen tai useamman kertaluvun, taajuuksien korkeiden, herätteiden merkitys kasvaa kiihtyvyydestä vääristäviksi. (Hakulinen 2009)

Edellä kuvattua taajuuksien erotteluun perustuvaa menetelmää käytetään GeoDynamik yhtiön valmistamassa Compactometer laitteessa. Kyseisen laitteen voi asentaa jälkiasennuksena periaatteessa kaikkiin täryttäviin jyräin. Tämän lisäksi Bomagin täryjyryissä käytetään Terrameter-nimistä laitetta, jonka toimintaperiaate eroaa edellä esitetystä ja perustuu maan kimmoisuuden mittaamisen sijasta tiivistäytymisen kautta johdettavaan menetelmään.

Terrameter-laitteen mittausmenetelmä lähtee siitä, että tiivistettäessä maahan siirretään energiaa. Maa imee osan energiasta ja osa palautuu takaisin valssille. Heijastussuhde riippuu maan saavuttamasta tiiviystilasta. Maahan siirtyneen tehollisen energian ja

valssin epäkeskon pyörähdysajan suhteena saadaan syötetty teho epäkeskon tekemää kierrosta kohti (kuva 28). Valssiin vaikuttavat voimat voidaan määrittää kuvan 27 ja yhtälön (8) mukaan.



Kuva 27: Tärävalssin pystyvoimien tasapaino (Ryynänen et al 1993)

$$F_B = F_{stat} + F_z - ma, \quad (8)$$

missä

F_B on maan reaktiovoima

F_{stat} on valssin staattinen kuorma

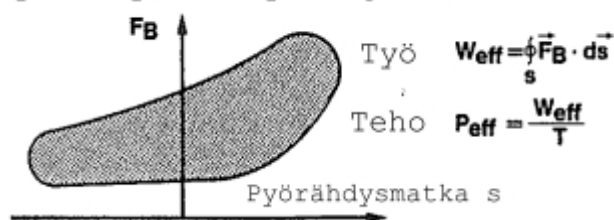
F_z on epäkeskon keskipakovoima

m on valssin massa

a on valssin kiihtyvyys

Tällöin tehokas luovutettu työ voidaan laskea työkaavasta (9) kuvan 28 avulla.

Pyörähdysajan työdiagrammi



Kuva 28: Valssin luovuttama teho P_{eff} epäkeskon pyörähdysajan aikana (Ryynänen et al 1993)

$$P_{eff} = f \int_T \vec{F}_B \cdot \vec{v} \cdot dt = f \int_T (\vec{F}_{stat} + \vec{F}_z - m \cdot \vec{a}) \cdot \vec{v} \cdot dt, \quad (9)$$

missä

\vec{v} = pyörimisnopeus

$f=1/T$ =frekvenssi.

Menetelmä poikkeaa muista dynaamisista mittausjärjestelmistä kiihtyvyyssantureiden lukumäärän, niiden sijoittelun, laskentamenetelmän ja tulostuksen suhteen. Laite tallentaa kiihtyvyyss lukeman jokaiselta epäkeskon kierrokselta. "Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen. Esitutkimus" raportin mukaan Bomagin tehtaan tutkimusosaston testien mukaan maan tiiviiden ja kantavuuden kasvaessa valssin kiihtyvyys kasvaa ja samalla laitteen laskeman värähdysmoduulin (vibration modul) E_{vib} [MN/m²] arvo kasvaa.

Tiiviysarvoa laskettaessa jyräysnopeus on molemmissa edellä esitetyissä menetelmistä muuttujana. Tästä syystä jyräysnopeus tulee pitää aina vakiona, jotta tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia. Alhaisilla nopeuksilla saadaan suurempia lukemia kuin nopeammin edettäessä. Lisäksi ajosuunnalla ja tärytystaajuudella on vaikutusta tulokseen, joten eri taajuuksilla tiivistettävien yliajokertojen arvoja ei tule verrata keskenään. (Ryynänen et al 1993)

4.2.4. Tiivistarkkailu työtapamenetelmällä

Tarkkailtaessa rakenteen riittävää tiivistymistä työtapamenetelmällä, tiivistäminen tehdään kerroksittain annettujen tiivistämisohjeiden mukaisesti. Ennen varsinaisen työn aloittamista tehdään käytettävillä materiaaleilla ja kalustoilla tiivistymiskokeita oikeiden työmenetelmien varmistamiseksi ja selvitetään käytössä oleville tiivistyskoneille työmaan olosuhteissa sopivat kerrospaksuudet ja yliajokerrat siten, että vaadittavat tiiviidet saavutetaan. Rakentamis- ja tiivistämistyön aikana seurataan tiivistettävän kerroksen paksuutta, yliajokertojen määrää ja käytettävän materiaalin laatua ja kosteutta. Työtapamenettelyn käytöstä laadunvalvontamenetelmänä on tehtävä merkintä työmaapäiväkirjaan. (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1)

5. TUTKIMUSKOHTEET

5.1. Tutkimusmenetelmän kuvaus

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tutkimukseen mukaan valikoituneiden hankkeiden kelpoisuuskirja-aineistojen ja laadunvalvontamittaustulosten pohjalta ratarakenteissa käytettävien materiaalien rakeisuuksien ja tiivistysmenetelmien vaikutusta alusrakenteen päältä saataviin kantavuuksiin. Tutkimuksessa selvitetään myös materiaalin rakeisuuden vaikutusta tiivistettävyyteen ja rakenteen tiiviyteen sekä sen mahdollista yhteyttä kantavuusarvoihin.

Tutkimukseen valikoitui kahdeksan eri hanketta, joista lisäksi kaksi jakautui useampaan aliurakkaan. Tutkimuskohteissa on mukana sekä luonnonmateriaaleilla että kalliomurskeilla rakennettuja kohteita, jotka sijoittuvat niin liikennepaikoille, rataoikaisuihin kuin täysin uusille rataosuuksille. Tutkimuskohteiden kelpoisuuskirjoista selvitettiin kohteissa käytetyt alusrakennemateriaalit ja niiden rakeisuudet sekä kohteissa käytettyjä alusrakenteen laadunvalvontamenetelmiä ja laadunvalvontamittausten tuloksia.

Tutkimuskohteiden kelpoisuuskirjoja saatiin käyttöön kohteiden urakoitsijoilta ja rakennuttajilta sekä Liikenneviraston arkistosta. InfraRYL ohjeistaa selkeästi kelpoisuuskirjoissa esitettävät asiat, jotka radan eristys- ja välikerroksen osalta ovat tieto käytettävän materiaalin laadusta, tiivistyskokeiden tuloksista, tarkemittauksista, sallittujen mittapoikkeamien ylityksistä ja niiden aiheuttamista toimenpiteistä (InfraRYL 2006, päivitysversio 2009/1). Tutkimuksessa mukana olleissa hankkeissa tehtyjen laadunvalvontakokeiden määrä vaihteli hyvin suuresti, johtuen osittain hankkeiden laajuuseroista.

Seuraavissa kappaleissa esitellään tutkimuskohteiden tausta- ja lähtötietoja sekä tutkimustulosten kannalta merkittävimmät alusrakenteiden laadunvalvonta-aineistot. Kohteissa käytettyjen materiaalien rakeisuudet on esitetty rakeisuuskäyrästöissä sinisellä värillä. Pinkillä värillä käyrästöissä on esitetty InfraRYL mukaiset materiaalikohtaiset rajakäyrät. Materiaalien vesipitoisuudet on saatu kelpoisuuskirjojen tiedoista ja ne on määritetty rakeisuusmääritysten yhteydessä. Luonnonmateriaaleilla materiaalien luokitus on ilmoitettu sekä yleisesti käytetyn GEO- luokituksen mukaan että Eurokoodien myötä voimaan tulevan CEN-ISO standardiluokituksen mukaan. Materiaalien rakeisuutta on pyritty indeksoimaan kahdella erillisellä mittarilla, materiaalin lajittuneisuutta kuvaavalla 60 ja 10 läpäisyprosentin raekokosuhteella

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (10)$$

sekä rakeisuuskäyrän kaarevuutta kuvaavalla kaavalla

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}. \quad (11)$$

Näiden kahden edellä mainitun materiaalin rakeisuusjakautumaa kuvaavien tunnuslukujen avulla pyrittiin selvittämään mahdollista yhteyttä materiaalin tiivistymiseen. C_U ja C_C arvoja käytetään molempia Eurokoodien mukaisessa karkearakeisten materiaalien maalajikuvauksen määrittelyssä. Rakeisuuskäyrän käyryyttä kuvaava C_C arvo on sitä suurempi mitä roikkuvampi käyrä on. Tyypillisesti kalliomurskeiden rakeisuuskäyrät ovat roikkuvia, C_C arvot >1 , ja luonnonmateriaalien enemmänkin kuperan muotoisia, C_C arvot <1 .

Kohteiden urakoitsijoilta pyrittiin selvittämään mahdollisimman kattavat tiedot kohteissa käytetyistä tiivistyskalustoista ja -menetelmistä. Tiivistysmenetelmiin liittyen selvitettiin lähinnä kerralla tiivistettävien kerrosten paksuuksia, jyräyslityskertojen määrää tiivistettävää kerrosta kohden sekä sitä, käytettiinkö tiivistämisen apuna kastelua.

5.2. Oriselän oikaisu

5.2.1. Yleistä

Oriselän oikaisu sijaitsee Orivedellä, rataosalla Tampere Jyväskylä, Oriveden liikennepaikasta noin 2 km Jyväskylän suuntaan kilometrivälillä 230+540-231+920 (kuva 29). Rata on kyseisellä kohdalla yksiraiteinen. Kyseisellä kohdalla rataa on aiemmin ollut stabiliteettiongelmia, jonka johdosta parannustöihin on ryhdytty. Rataosalla liikennöi sekä henkilö- että tavarajunaliikennettä, joita molempia kulkee molemmat suunnat yhteenlaskettuna noin 20 junaa, eli yhteensä noin 40 junaa vuorokaudessa (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a).



Kuva 29: Kohteen sijainti ja kuva kohteesta km231+413 länteen päin (karttakuvat © Maanmittauslaitos, kuva Liikenneviraston Ratakuvapalvelu)

Parannetun osuuden toimenpidealueen pituus on yhteensä 1320 metriä, josta maanvaraista pengertä on 560 m ja loput 760 m on sillalla kulkevaa tai paalulaatan varaan rakennettua pengertä. Maanvaraan rakennetulla osuudella stabiliteetin parantamistoinenpiteinä käytettiin vastapenkereitä, esikuormituspenkereitä ja massanvaihtoa. Rakennekerrosten kokonaispaksuus parannuskohteessa siltoja lukuun ottamatta on 2200 mm, koostuen 550 mm tukikerroksesta, 300 mm välikerroksesta ja 1350 mm paksuisesta eristyskerroksesta. Alusrakenteen ja pohjamaan välissä käytettiin suodatinkangasta. Kohteen rakentaminen toteutettiin vuonna 2008.

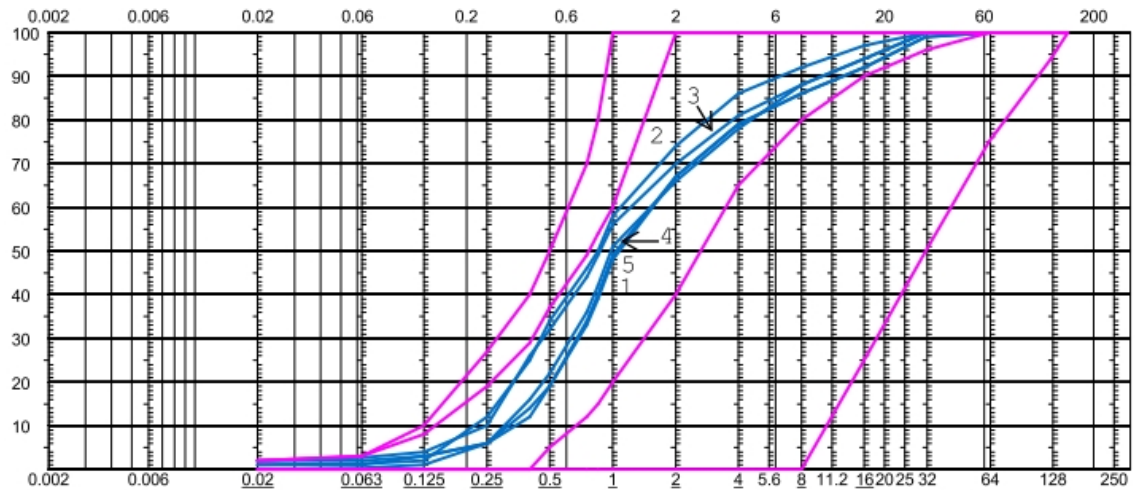
5.2.2. Pohjaolosuhteet

Suurin osa alueen pohjatutkimuksista on tehty vuonna 2006 painokairauksina, joita on täydennetty heijari- ja porakonekairauksin lähinnä paalupituuksien kartoittamiseksi. Näiden lisäksi alueella on tehty noin kymmenen siipikairausta ja otettu joitakin häiriintyneitä ja häiriintymättömiä näytteitä.

Tarkasteltavalla toimenpidealueella rata kulkee sillalla Oriselän järven yli kilometrivälillä 230+800-231+200. Tehtyjen kairausten perusteella ennen siltaa noin metrin paksuisen moreenikerroksen alla on 2-5 metriä paksu silttikerros, jonka alla on vielä 2-4 metrin paksuinen moreenikerros ennen kalliopintaa. Sillan jälkeisellä osuudella ohuen pintamaakerroksen alla on 4-10 m paksuinen siltti-/savinen silttikerros, jonka alla vielä paikoitellen 1-8 m paksuinen savikerros. Siltin siipikairalla määritetty leikkauslujuus on 8-20 MPa heikentyen maanpinnasta syvemmälle mentäessä. Savelle siipikairalla määritetyt leikkauslujuudet ovat 10 MPa luokkaa. Kalliopinta on tällä välillä pääosin melko syvällä, 10-18 metrissä, käyden kuitenkin yhdessä kohtaa maanpinnan tasolla aiheuttaen louhintatarvetta noin 40 metrin matkalla.

5.2.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kohteen kelpoisuuskirjojen perusteella tiiviys- ja kantavuusmittauksia on tehty ainoastaan kilometrivälillä 231+210-231+800. Tällä välillä pohjanvahvistustoimenpiteinä on käytetty esikuormitusta kilometrivälillä 231+210-231+490 ja lisäksi vastapenkereitä molemmin puolin kilometrivälillä 231+300-231+360 sekä paalulaattaa kilometrivälillä 231+490-231+705, jonka loppupäähän on tehty 15 m pituinen massanvaihto. Rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien laadunvarmistuksessa on käytetty materiaalitoimitajien omaa laadunvalvontaa. Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen aineistojen mukaan kohteessa ei ole otettu rakeisuusmääritysnäytteitä rakennetusta valmiista penkereestä.

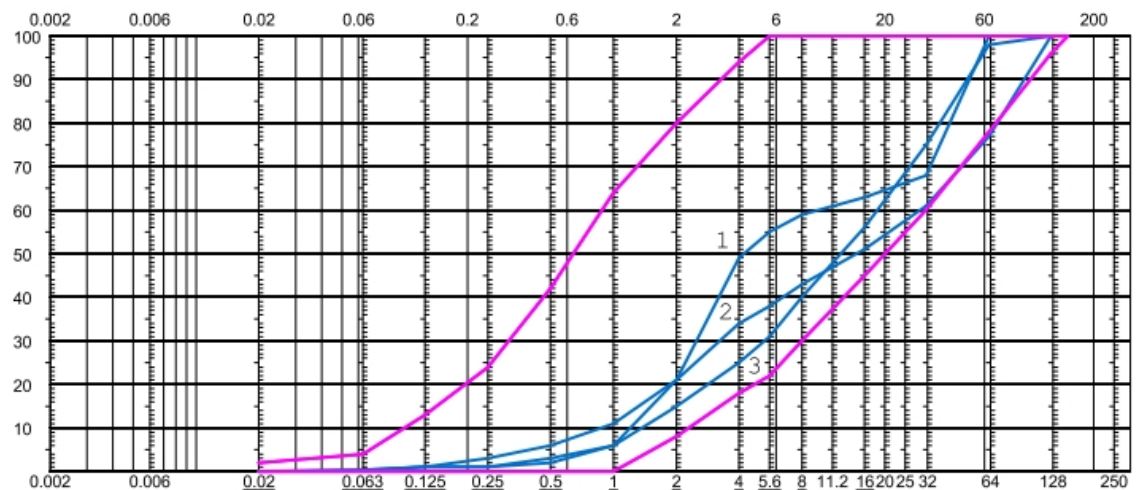


Kuva 30: Kohteessa käytettyjen eristyskerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät

Taulukko 8: Kohteessa käytettyjen eristyskerrosmateriaalien vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritykset

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C_U	C_C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	1.40	4.9	0.82	srHk/grSa
2	2.90	5.0	0.83	srHk/grSa
3	2.60	5.2	0.62	srHk/grSa
4	1.90	5.3	0.71	srHk/grSa
5	1.40	4.9	0.82	srHk/grSa

* Kaikki näytteet edustavat tavaratoimittajien esittämiä rakeisuusmäärittämiä toimittamilleen materiaaleille



Kuva 31: Kohteessa käytettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät

Taulukko 9: Kohteessa käytettyjen välikerrosmateriaalien vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat luvut sekä maalajimääritykset

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	2.20	8.0	0.54	hkSr/saGr
2	2.50	31.6	0.43	hkSr/saGr
3	3.50	14.4	1.11	Sr/Gr

* Kaikki näytteet ovat tavaratoimittajien esittämiä rakeisuusmäärityksiä toimittamalleen materiaalille.

Taulukko 10: Kohteessa välikerroksen päältä tehtyjen tiiviysmittausten ja vesipitoisuusmääritysten tulokset

Paalu km	Mittauspiste			Tiiviysaste	Vesipitoisuus [%]	Pohjanvahvistus
231+...	vas	kl	oik	Troxler	Troxler	toimenpide
240		x		99.0	3.5	esikuormitus
240	x			99.3	4.3	esikuormitus
240			x	95.3	4.2	esikuormitus
260		x		97.5	6.2	esikuormitus
320			x	94.3	5.4	vastapenger
320		x		98.3	6.2	vastapenger
320	x			97.7	6.5	vastapenger
360		x		98.4	5.3	vastapenger
440	x			98.0	6.0	esikuormitus
440			x	99.7	5.2	esikuormitus
520		x		94.6	4.8	paalulaatta
620	x			97.8	5.1	paalulaatta
620		x		101.1	4.8	paalulaatta
620			x	98.2	4.7	paalulaatta
660			x	95.6	4.8	paalulaatta
685			x	94.6	2.9	paalulaatta
730	x			97.3	3.8	kallioleikkaus
800	x			93.9	1.7	siirtymäkiila
Keskiarvo				97.3		
Maksimi				101.1		
Minimi				93.9		

Taulukko 11: Kohteessa välikerroksen päältä tehtyjen kantavuusmittausten tulokset

Paalu km	Mittauspiste			Levykuormitus [MPa]			Pohjanvahvistus
	vas	kl	oik	E ₁	E ₂	E ₂ /E ₁	toimenpide
231+...	x			103	180	1.75	esikuormitus
210		x		109	191	1.75	esikuormitus
210			x	94	166	1.77	esikuormitus
211			x	108	182	1.69	esikuormitus
240		x		110	150	1.36	esikuormitus
260		x		116	186	1.60	esikuormitus
320		x		131	174	1.33	vastapenger
360		x		120	208	1.73	vastapenger
360	x			86	151	1.76	vastapenger
360			x	133	210	1.58	vastapenger
460		x		84	151	1.80	esikuormitus
564		x		100	172	1.72	paalulaatta
660			x	121	195	1.61	paalulaatta
660		x		90	155	1.72	paalulaatta
660	x			127	199	1.57	paalulaatta
Keskiarvo					178	1.65	
Maksimi					210	1.80	
Minimi					150	1.33	

5.3. Kiimasuon oikaisu

5.3.1. Yleistä

Kiimasuon oikaisu sijaitsee Kylmäkosken kunnan alueella rataosalla Toijala Turku, Toijalan liikennepaikasta noin 8 km Turun suuntaan kilometrivälillä 155+200-156+700 (kuva 32). Rata on kyseisellä kohdalla yksiraiteinen. Rata kulkee kilometrivälillä 155+675-156+430 Kiimasuon poikki, jossa ratapenkereen stabiliteetti on vastapenkeleistä huolimatta ollut heikko. Rataosalla liikennöi sekä henkilö- että tavarajunaliikennettä. Henkilöjunia radalla liikennöi hieman alle 20 vuorokaudessa ja tavarajunia alle 10 vuorokaudessa molemmat liikennöintisuunnat huomioituina (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a).



Kuva 32: Kohteen sijainti ja kuva kohteesta km155+704 lounaaseen päin (karttakuvat © Maanmittauslaitos, kuva Liikenneviraston Ratakuvapalvelu)

Rataoikaisun pituus on yhteensä 1400 metriä, josta kantavalla pohjamaalla olevaa pengertä on 675 m, paalulaatalle rakennettua pengertä 265 m ja lopulla 560 m matkalla on turvekerrosten osalta tehty massanvaihto. Pengerkorkeus tarkastelujaksolla vaihtelee 2-3,5 m välillä. Rakennekerrosten kokonaispaksuus on 2200 mm, koostuen 550 mm tukikerroksesta, sekä 1650 mm paksuisesta yhdistetystä väli- ja eristyskerroksesta. Kohde valmistui vuonna 2008.

Kohteen urakoitsijalta saatujen tietojen mukaan tiivistystyö tehtiin kohteessa 13 t yksivalssisella täryjyrällä, jossa oli tiiviysmittari. Tiivistystyön aikana rakenteeseen ajettiin vettä ja materiaalia toimittavat autot ajoivat penkan päällä "uusilla jäljillä", eli autot ajoivat aina eri kohdassa pengertä siitä aiheutuvan tiivistymisen tasaamiseksi koko penkereen leveydelle. Jyräskertoja seurattiin urakoitsijan mukaan jyrän tiiviysmittarista ja visuaalisesti pintaa tarkastelemalla.

5.3.2. Pohjaolosuhteet

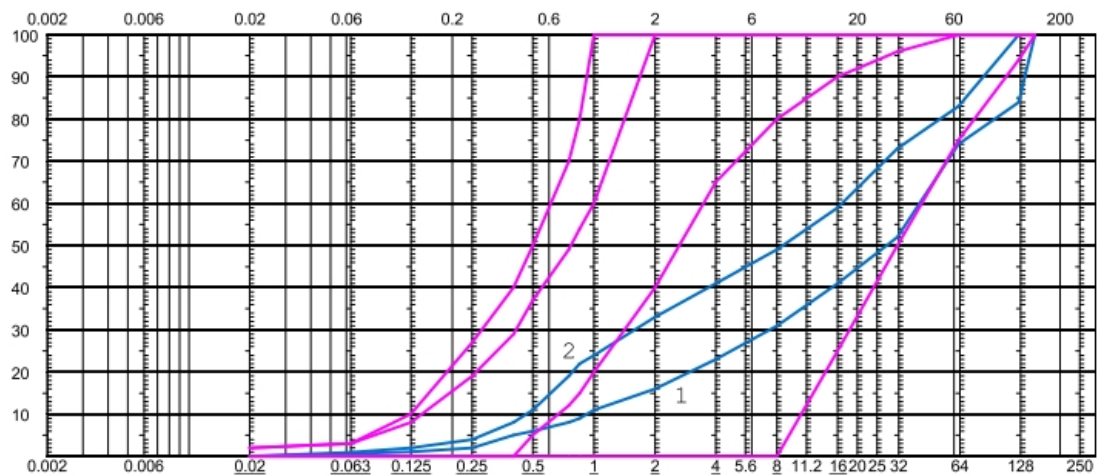
Vanhon arkistoitujen suunnitelmien mukaan suurin osa alueen pohjatutkimuksista on tehty vuosina 2006 ja 2007 painokairauksina, joita on täydennetty heijari- ja puristinheijarikairauksilla kalliopinnan varmistamiseksi. Näiden lisäksi alueella on tehty kuutisen siipikairausta pääasiassa turvekerroksen leikkauslujuuden määrittämiseksi ja otettu yksi häiriintymätön näyte.

Alueella tehtyjen tutkimusten perusteella tarkasteltavan rataoikaisun alueella kantan pohjamaan osuuksilla kalliopinta on hyvin lähellä maanpinnan tasoa, jonka päällä on 1-3 m paksuinen hiekka/moreenikerros. Kiimasuon alueella päällimmäisenä kerroksena on 1-4 metrin paksuinen turvekerros. Suon pienempien ratakilometrien päässä turvekerroksen alla on 0-2 m paksuinen savikerros, jonka alla on tiiviimpiä kitkamaakerroksia. Suon loppupäässä turvekerroksen alla on 1-4 m paksuinen savikerros ennen ti-

viimpiä sora ja moreeni kerroksia. Kalliopinta kyseisellä suo-osuudella on tehtyjen kai-
rausten perusteella noin 8-10 m syvyydellä. Turpeen siipikairalla määritetyt leikkauslu-
juudet vaihtelevat välillä 8-20 MPa. Turpeen alapuoliselle savelle on yhdessä siipikaira-
uksessa määritetty leikkauslujuudeksi kerroksen yläpinnan 8 MPa:ista kerroksen alapin-
nan 20 MPa:iin.

5.3.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kohteen kelpoisuuskirjojen perusteella tiiviys- ja kantavuusmittauksia on tehty kilomet-
rivälillä 155+500-156+400. Tällä välillä kantavan pohjamaan osuuksia on kilometrivä-
leillä 155+470-155+675 ja 156+030-156+070, massanvaihto-osuuksia kilometriväleillä
155+675-156+030, 156+070-156+085 ja 156+350-156+470 sekä paalulaattaa kilometri-
välillä 156+085-156+350. Rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien laadunvarmis-
tuksessa on käytetty materiaalitoimittajien omaa laadunvalvontaa ja näiden lisäksi on
tehty yksi rakeisuusmääritysnäyte valmiista välikerroksesta. Kohteessa alusrakenne ra-
kennettiin yhdistettynä eristys- ja välikerroksena, mikä oli mahdollista sillä molemmat
kerrokset tehtiin samasta rintauksesta otetusta materiaalista. Vaikka seuraavissa rakei-
suusmäärityksiä esittävissä kuvissa mainitaan eristys- ja välikerrosmateriaalit, ovat ne
samaa materiaalia. Materiaalitoimittaja vain oli ilmeisesti luokitellut materiaalit käyttö-
kohteen mukaan.

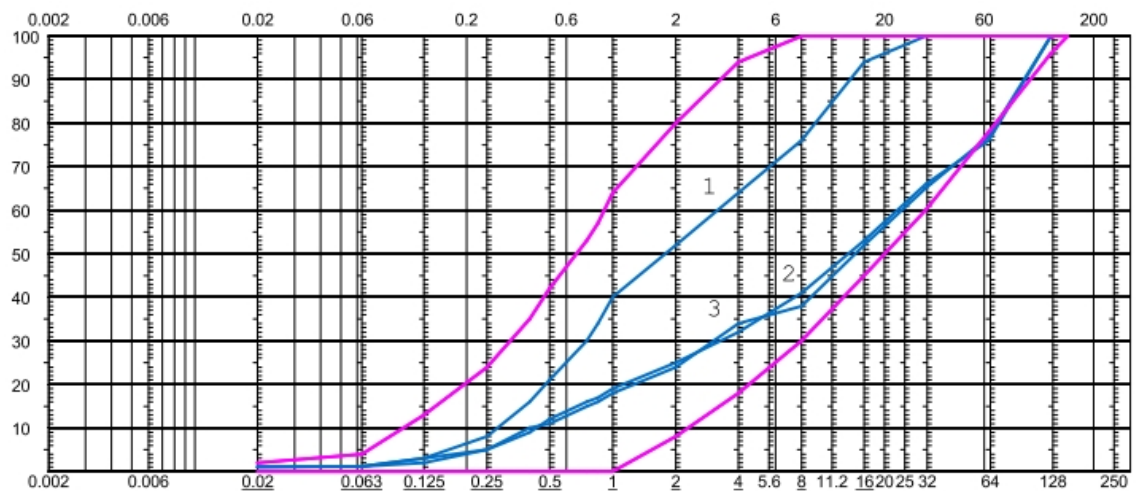


Kuva 33: Kohteessa käytettyjen eristyskerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät

Taulukko 12: Kohteessa käytettyjen eristyskerrosmateriaalien vesipitoisuus, materiaalin
lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimäärityk-
set

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	3.40	47.4	1.32	Sr/Gr
2	3.30	35.9	0.38	hkSr/saGr

* Molemmat näytteet edustavat tavaratoimittajan esittämiä rakeisuusmäärityksiä toimit-
tamalleen materiaalille



Kuva 34: Kohteessa käytettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät

Taulukko 13: Kohteessa käytettyjen välikerrosmateriaalien vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritykset

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C_U	C_C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1*	2.90	11.5	0.67	srHk/grSa
2	3.30	51.1	1.20	Sr/saGr
3	3.50	57.5	1.11	Sr/saGr

* Näyte 1 on otettu tiiviys- ja kantavuusmittausten yhteydessä valmiista penkereestä ja näytteet 2 ja 3 tavaratoimittajan esittämiä rakeisuuskäyriä toimittamalleen materiaalille.

Taulukko 14: Kohteessa välikerroksen päältä tehtyjen tiiviysmittausten ja vesipitoisuusmääritysten tulokset

Paalu km	Mittauspiste			Tiiviysaste Troxler	Vesipitoisuus [%] Troxler	Pohjanvahvistus toimenpide
	vas	kl	oik			
155+...						
500		x		98.4	4.1	Kantavalla pohjalla
800		x		99.4	4.2	Massanvaihto
800	x			97.4	4.4	Massanvaihto
156+...						
100		x		97.4	3.0	Paalulaatta
100			x	98.4	3.7	Paalulaatta
400		x		99.3	3.6	Massanvaihto
Keskiarvo				98.4		
Maksimi				99.4		
Minimi				97.4		

Taulukko 15: Kohteessa väli- ja eristyskerroksen päältä tehtyjen kantavuusmittausten tulokset

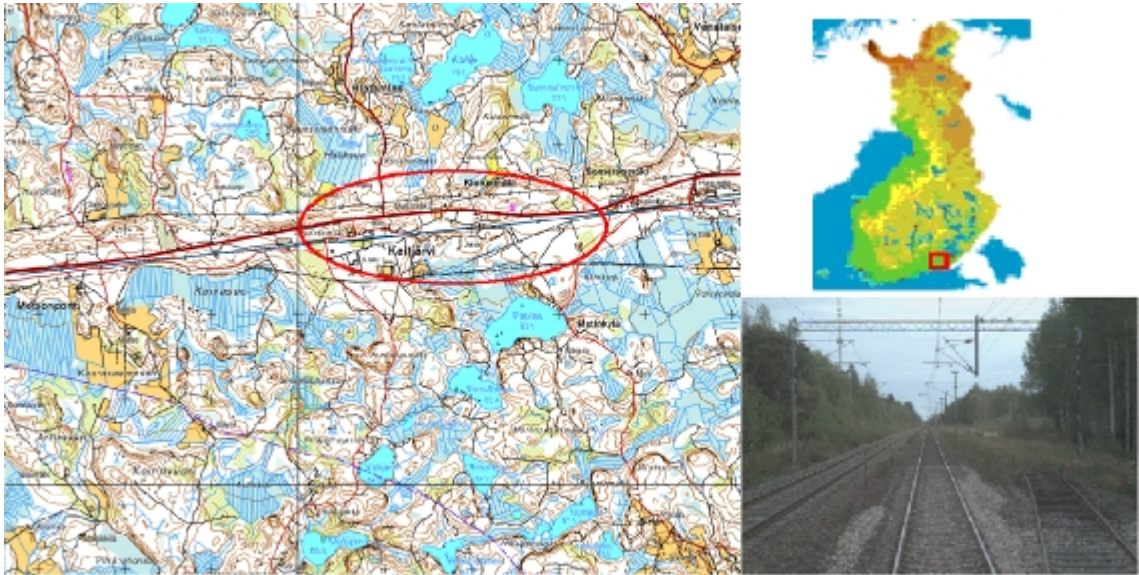
Paalu km	Mittauspiste			Levykuormitus [MPa]			Pohjanvahvistus toimenpide
	vas	kl	oik	E ₁	E ₂	E ₂ /E ₁	
Välikerros							
156+...							
040		x		97	161	1.66	Kantavalla pohjalla
160*			x	77	141	1.83	Paalulaatta
160*	x			36	87	2.42	Paalulaatta
160			x	28	76	2.71	Paalulaatta
160		x		86	147	1.71	Paalulaatta
160	x			62	132	2.13	Paalulaatta
340*		x		125	186	1.49	Paalulaatta
Keskiarvo					133	1.99	
Maksimi					186	2.71	
Minimi					76	1.49	
Eristyskerros							
155+...							
940*	x			86	159	1.85	Massanvaihto
940*			x	135	212	1.57	Massanvaihto
940	x			70	123	1.76	Massanvaihto
940		x		88	159	1.81	Massanvaihto
940			x	47	100	2.13	Massanvaihto
156+340		x		58	123	2.12	Paalulaatta
Keskiarvo					146	1.87	
Maksimi					212	2.13	
Minimi					100	1.57	

* merkityt mittaukset tehty 2vk ensimmäisten mittausten jälkeen

5.4. Kaitjärven liikennepaikka

5.4.1. Yleistä

Kohde sijaitsee Luumäellä rataosalla Lahti- Luumäki noin 35 km Kouvolasta itään kilometrivälillä 225+900-229+300 (kuva 35). Lahti- Luumäki perusparannushankkeen yhteydessä Kaitjärvelle rakennetaan uudet ohitusraiteet, joilla parannetaan rataosan välityskykyä. Rataosa Lahti-Luumäki on kaksiraiteinen ja Kaitjärven liikennepaikalla neliraiteinen. Rataosa on vilkkaasti liikennöity sekä tavara- että henkilöjunien osalta ja sitä käyttää valtaosa itäisen Suomen raideliikenteestä. Tavarajunia liikennöi vuorokaudessa lähes 50 junaa ja henkilöjunia noin 25 kpl molemmat liikennöintisuunnat huomioituina (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a).



Kuva 35: Kohteen sijainti ja kuva kohteesta km 226+594 itään päin (karttakuvat © Maanmittauslaitos, kuva Liikenneviraston Ratakuvapalvelu)

Kummallekin puolelle nykyistä ratapengertä rakennettiin noin 1,3 km uutta pengertä kilometrivälille 226+600-227+900. Kohteen alusrakenne rakennettiin ensin vuonna 2009 ja vuonna 2010 alusrakennetta tiivistettiin lisää ennen pohjasepelöinnin tekemistä. Vuoden 2010 tulokset eivät ole tutkimuksessa mukana.

5.4.2. Pohjaolosuhteet

Vanhojen suunnitelmien mukaan liikennepaikan alueella on tehty jonkin verran painokairauksia ja liikennepaikan länsipuolelta on otettu kaksi näytettä 1990-luvun puolivälissä rakennetun alikulkusillan suunnittelun yhteydessä.

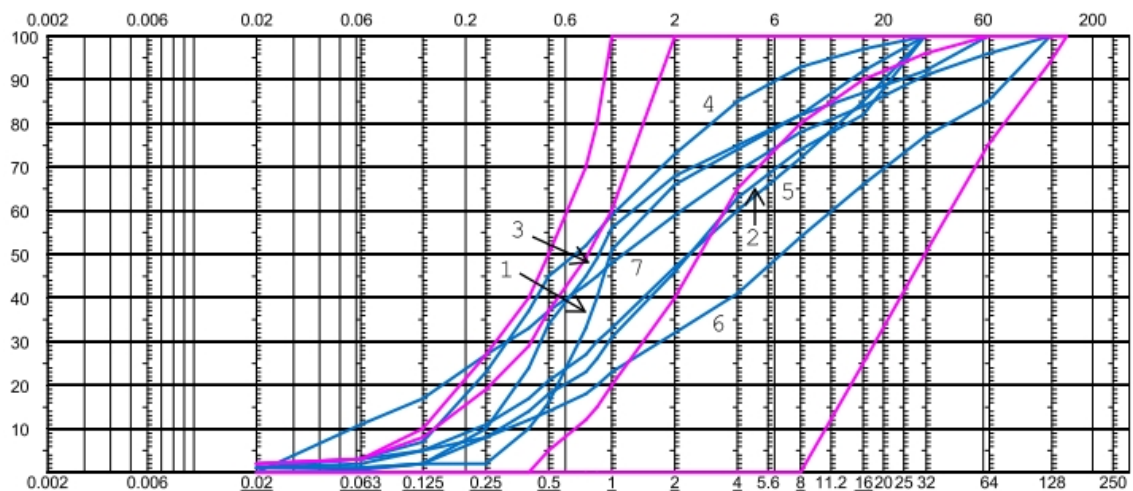
Kairausten ja tehtyjen tutkimusten perusteella tarkasteltavalla toimenpidealueella pohjamaa on kauttaaltaan soraista hiekkaa/hiekkaista soraa 5-7 metrin syvyyteen maanpinnasta. Hiekka/sorakerroksen alla on moreenia. Syvimmät kairaukset on ulotettu noin 10 m syvyyteen saavuttamatta kalliopintaa. Alikulkusillan kohdalla on asennettuna kaksi pohjavesiputkea 8 m ja 9 m syvyyteen. Molemmat pohjavesiputket ovat olleet kuivina.

5.4.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kohteen kelpoisuuskirjojen perusteella tiiviysmittauksia on ensimmäisissä laadunvalvontamittauksissa tehty kilometrivälillä 226+660-227+860. Kantavuusmittauksia ei kelpoisuuskirjojen mukaan tehty tässä vaiheessa lainkaan. Rakennustöiden yhteydessä purettujen penkereiden materiaaleja käytettiin osittain uudelleen uusissa rakennekerroksissa. Rakennekerroksissa käytettyjen uusien materiaalien laadunvarmistuksessa on käytetty eristyskerroksen osalta materiaalitoimittajan omaa laadunvalvontaa. Välikerroksen osalta on tehty materiaalitoimittajan oman laadunvalvontamäärittelysten lisäksi myös paa-lukohtaisia rakeisuusmäärittelyksiä.

Kohteen silmämääräisessä vastaanottotarkastuksessa alusrakenteessa havaittiin puutteita, jonka jälkeen kohteessa tehtiin lisätutkimuksia. Jatkotutkimuksissa tehtiin tiivysmittauksia sekä volymetrillä että säteilymittauslaitteella, minkä lisäksi tehtiin myös kantavuusmittauksia levykuormituskokein. Näiden lisäksi otettiin lukuisia paalukohtaisia näytteitä, joista määritettiin muun muassa materiaalin rakeisuutta.

Kohteen urakoitsijalta saatujen tietojen mukaan tiivistyksessä käytettiin 13 tonnin yksivalssista täryjyriä, jossa oli tiivysmittari. Jyräyskerroista tai tiivysmittarin käytöstä tiivistystyön yhteydessä ei ole tarkempia tietoja. Rakennekerrosmateriaalit kuljetettiin rakenteeseen kauhakuormaajalla.

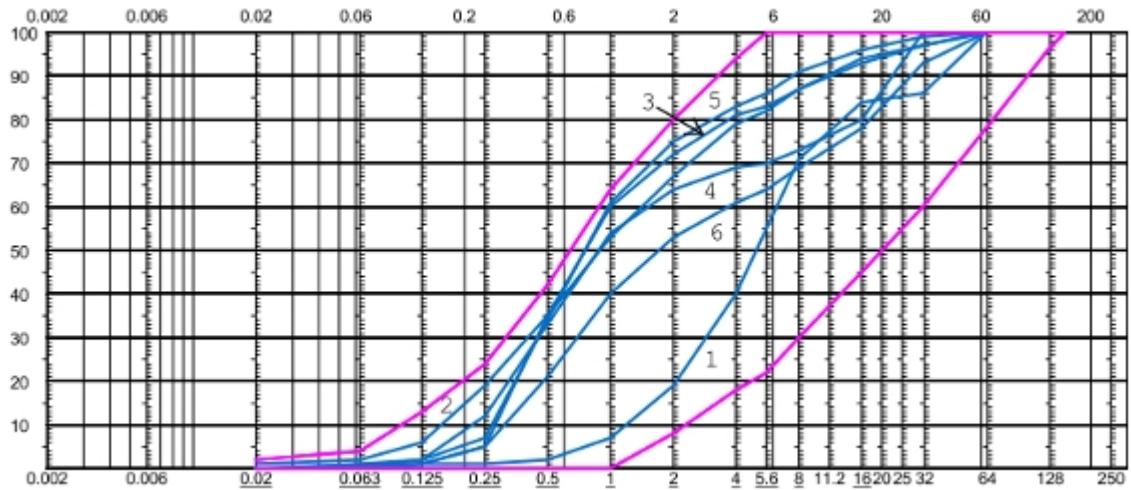


Kuva 36: Kohteen eristyskerrosmateriaalien rakeisuuskäyriä

Taulukko 16: Kohteen eristyskerroksessa käytettyjen materiaalien vesipitoisuus, materiaalien lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritykset

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	2.30	4.3	0.83	Hk/grSa
2	1.10	11.9	0.77	hkSr/saGr
3	1.50	5.8	0.60	Hk/grSa
4	3.30	7.1	0.78	Hk/grSa
5	1.20	19.0	0.86	hkSr/saGr
6	-	37.3	1.07	Sr/saGr
7	-	38.2	0.89	hkMr/grSa

*Näyte 1 on materiaalitoimittajan esittämä rakeisuuskäyrä, näytteet 2-5 urakoitsijan teettämiä paalukohtaisia rakeisuuskäyriä valmista penkereestä paaluilta 226+650, +670, +710 ja 810. Näytteet 6-7 ovat jatkotutkimuksissa otettujen näytteiden paalukohtaisia rakeisuusmäärityksiä paaluilta 226+850 ja +750.



Kuva 37: Kohteen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyriä

Taulukko 17: Kohteen välikerrosmateriaalien vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja kaarevuutta kuvaavat luvut sekä maalaajimääritykset

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	1.60	5.5	1.05	Sr/Gr
2	2.80	9.7	0.68	Hk/grSa
3	-	3.7	0.59	Hk/grSa
4	1.80	7.5	0.56	Hk/grSa
5	-	3.3	0.72	Hk/grSa
6	2.50	11.7	0.38	Hk/grSa

*Näyte 1 on materiaalitoimittajan esittämä rakeisuuskäyrä, näytteet 2, 4 ja 6 ovat urakoitsijan teettämää paalukohtaisia rakeisuusmäärittämiä valmiista rakenteesta paaluilta 226+720, +800 ja 227+760. Näytteet 3 ja 5 ovat jatkotutkimuksissa määritettyjä paalukohtaisia rakeisuuskäyriä paaluilta 226+750 ja 227+150.

Taulukko 18: Kohteen eristyskerroksesta tehtyjen tiiviysmittausten laadunvalvontatulokset

Paalu		Sijainti			Tiiviysaste	Vesipitoisuus
km	m	vas	kl	oik	(Troxler)	
226	660	x			93.8	2.9
	660			x	95.4	2.7
	720	x			95.9	2.1
	720			x	96.3	1.2
	800	x			99.8	2.1
	800			x	98.9	2.3
	900	x			100.2	2.4
	900			x	99.6	2.5
227	000	x			92.7	1.5
	000			x	94.9	1.7
	120	x			97.4	2.2
	120			x	96.9	1.7
	200			x	95.0	2.4
	230	x			93.7	4.4
	500	x			95.5	1.2
	500			x	95.9	1.2
	620	x			95.5	1.8
	620			x	96.0	2.1
	720	x			92.3	1.3
	720			x	94.4	1.3
	800	x			94.0	1.0
	800			x	95.1	1.1
	900	x			93.3	1.7
	900			x	95.0	1.3
keskiarvo					95.7	
maksimi					100.2	
minimi					92.3	

Taulukko 19: Kohteen välikerroksesta tehtyjen tiiviysmittausten laadunvalvontatulokset

Paalu		Sijainti			Raide	Tiiviysaste (Troxler)	Vesipitoisuus
km	m	vas	kl	oik			
226	660	x			ete	93.4	2.5
	660			x	ete	93.4	3.5
	660	x			poh	95.5	1.3
	660			x	poh	99.1	2.1
	960	x			ete	97.0	1.9
	960			x	ete	99.7	2.0
	960	x			poh	97.6	1.5
	960			x	poh	94.1	2.5
227	260	x			ete	99.0	1.9
	260			x	ete	99.1	1.9
	260	x			poh	98.3	1.5
	260			x	poh	97.2	2.5
	560	x			ete	98.2	2.3
	560			x	ete	99.7	2.6
	560	x			poh	98.1	2.7
	560			x	poh	96.6	2.6
	860	x			ete	96.9	2.1
	860			x	ete	98.6	2.3
	860	x			poh	92.5	1.8
	860			x	poh	97.8	2.1
	keskiarvo					97.1	
	maksimi					99.7	
	minimi					92.5	

Taulukko 20: Kohteessa välikerroksesta tehtyjen jatkotutkimusten tiiviys- ja kantavuusmittausten tulokset

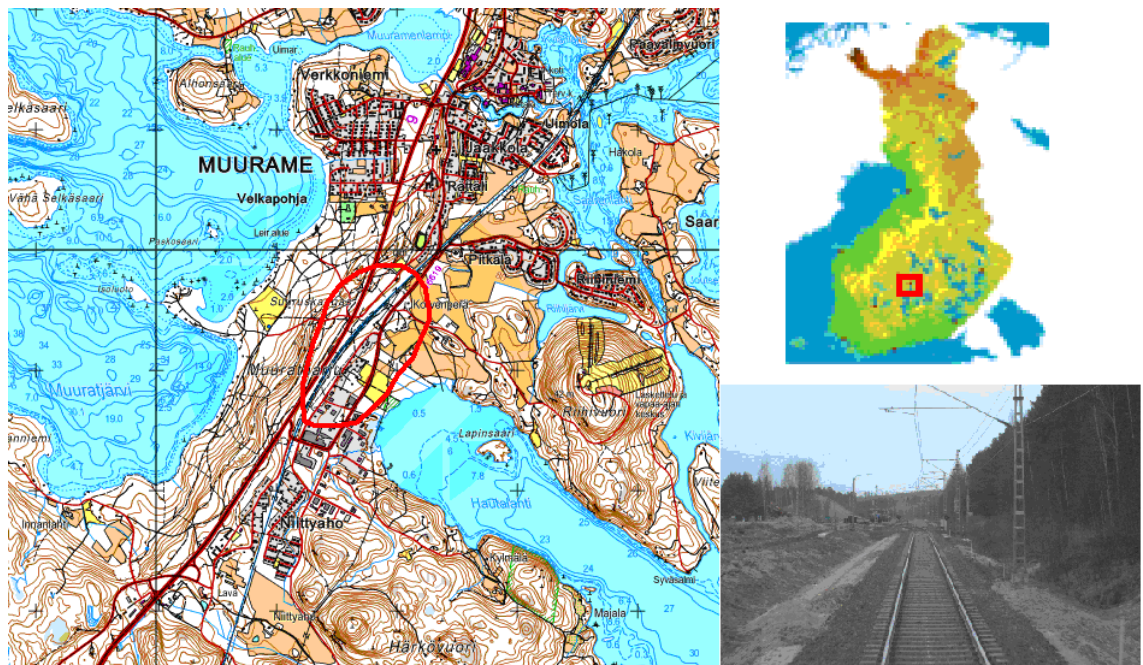
Paalu		Tiiviysaste (Volymetri)	Vesipitoisuus	Kantavuus			Näytte penkereestä	
km	m			E1	E2	E2/E1	C _U	C _C
226	650	93.2	0.7	19	55	2.92	5.4	0.77
	750	88.4	0.8	42	83	1.99	3.5	0.72
	850	93.6	0.7	16	42	2.59	3.4	0.82
	950	88.1	0.8	24	67	2.85	5.1	0.75
227	050	101.0	0.4	15	46	2.99	5.2	0.78
	150	90.2	1.1	28	68	2.43	3.6	0.8
	250	89.8	0.8	17	88	5.07	8.2	0.31
	350	86.2	0.8	30	73	2.44	3.6	0.61
	450	91.9	3.4	32	84	2.63	4.3	0.62
	550	89.9	0.9	48	92	1.93	3.7	0.7
	650	89.0	4.2	26	75	2.90	6.1	0.58
	750	91.2	0.6	33	84	2.53	5.1	0.7
	850	89.4	4.1	34	79	2.35	13.7	0.42
	keskiarvo	90.9			72	2.74		
	maksimi	101.0			92	5.07		
	minimi	86.2			42	1.93		

5.5. Muuramen liikennepaikka

5.5.1. Yleistä

Muuramen liikennepaikka sijaitsee rataosuudella Tampere-Pieksämäki, Jämsänkosken ja Jyväskylän välillä, noin 16 km Jyväskylän liikennepaikasta Tampereen suuntaan kilometrivälillä 324+260-325+445 (kuva 38). Rata on kyseisellä kohdalla yksiraiteinen ja sähköistetty. Rataosan suurin sallittu nopeus on 160 km/h ja suurin sallittu akselipaino 225 kN. Rataosalla on sekä henkilö- että tavaraliikennettä. Henkilöjunia radalla liikennöi hieman yli 20 junaa ja tavarajunia noin 10 kpl vuorokaudessa molemmat liikennöinti suunnat yhteenlaskettuna (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a). Liikennepaikalla ei ole kaupallista toimintaa, vaan se toimii yksinomaan liikenteenohjauksen käytössä kohtauspaikkana.

Rataosan parantamistöihin liittyen Muuramen liikennepaikka pidennettiin noin 200 metrillä Jyväskylään päin. Raiteen jatkamiseen liittyen uusittiin myös vaihteita. Jatkettavan raiteen alueelle tehtiin massanvaihto korkeusviivasta mitattuna 2,0 m syvyyteen. Pääraiteen ja kohtaamisraiteen liitokseen rakennettava uusi vaihde perustettiin 2,2 m syvyyteen korkeusviivasta massanvaihdoilla. Rakennekerrokset jatkettavan raiteen osalla koostuvat 550 mm tukikerroksesta ja 1450 mm paksuisesta yhdistetystä eristys- ja välikerroksesta. Uuden vaihteen kohdalla alusrakenteen paksuutta lisättiin 1650 mm paksuiseksi. Kohde valmistui vuonna 2009.



Kuva 38: Kohteen sijainti ja kuva kohteesta km 325+394 lounaaseen päin (karttakuvat © Maanmittauslaitos, kuva Liikenneviraston Ratakuvapalvelu)

5.5.2. Pohjaolosuhteet

Vanhon pohjatutkimustiedostojen perusteella alueelta on tehty muutama painokairaus sekä neljä puristin-heijarikairaus ja joitakin tärykairauksia ratapenkereen rakennekerrosten paksuuksien kartoittamiseen. Näiden lisäksi alueelta on otettu viitisen kappaletta häiriintyneitä näytteitä.

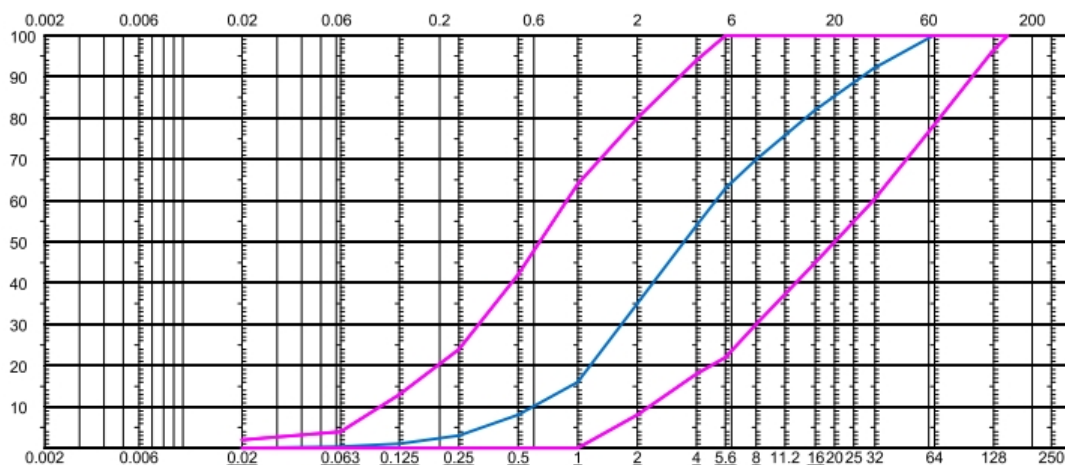
Vanhon kairauksen perusteella tarkasteltavan kohtaamisraiteen jatkeen alueella pohjamaa on savista silttiä/hienoa hiekkaa. Alueella tehdyt kairaukset on lopetettu määräsyyvyteen. Syvimät kairaukset ovat ulottuneet noin 5 m maanpinnan alapuolelle. Näillä syvyyksillä ei kalliopintaa ole havaittu.

Tehtyjen tutkimusten perusteella nykyisen raiteen ja uuden kohtaamisraiteen liitoskohdassa noin 600 mm paksuisen raidesepelikerroksen alla on 1,3 - 2,0 m syvyyteen ulottuva kerros routimatonta täytehiekkää. Hiekkakerroksen alla on routivaa silttistä hiekkaa, savista silttiä ja silttiä. Routivan kerroksen yläpinnan on tutkimuksien perusteella arvioitu rakentamissuunnittelun yhteydessä olevan syvyydellä 1,3 - 2,0 m.

5.5.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kohteen kelpoisuuskirjojen perusteella kantavuusmittauksia on tehty kilometrivälillä 325+270-325+420, eli koko massanvaihto-osuudelta. Rakenteen tiivysmittauksia ei kohteessa ole kelpoisuuskirjojen mukaan tehty. Rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien laadunvarmistuksessa on käytetty materiaalitoimittajien omaa laadunvalvontaa. Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen aineistojen mukaan kohteessa ei ole otettu rakeisuusmääritysnäytteitä rakennetusta valmiista penkereestä.

Urakoitsijalta saatujen tietojen mukaan rakennekerrosten rakentaminen tehtiin noin puolen metrin kerroksissa. Tiivistymistä edesautettiin kastelemalla materiaalia jatkuvasti tiivistystyön aikana. Tiivistyskalustona oli 4,4 t kaksoisvalssijyrä. Jyräysylityskerrat määritettiin jyräysylityskertojen ohjetaulukon, taulukko 6, mukaisesti 5-6 ylityskertaa tiivistettävää kerrosta kohden.



Kuva 39: Kohteen yhdistetyn eristys- ja välikerrosmateriaalin rakeisuuskäyrä

Taulukko 21: Kohteen yhdistetyn eristys- ja välikerrosmateriaalin vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	1,7	8,1	0,98	hkSr/saGr

* Näyte on materiaalitoimittajan esittämä rakeisuusmääritys materiaalista

Taulukko 22: Kohteen välikerroksen päältä tehtyjen kantavuusmittausten tulokset

Paalu	Kantavuus		
	E1	E2	E2/E1
325+273	239	258	1.08
+296	193	217	1.12
+314	189	210	1.11
+327	230	208	0.90
+345	253	230	0.91
+364	150	136	0.91
+364	191	230	1.20
+380	180	201	1.12
+400	165	160	0.97
+420	136	159	1.17
+440	193	187	0.97
+460	170	191	1.12
Keskiarvo		199	1.05
Maksimi		258	1.20
Minimi		136	0.90

* paaluvälillä 380–460 uusi pengerosuus kapenee ja loppuu, yhtyen pääraiteen penkereeseen

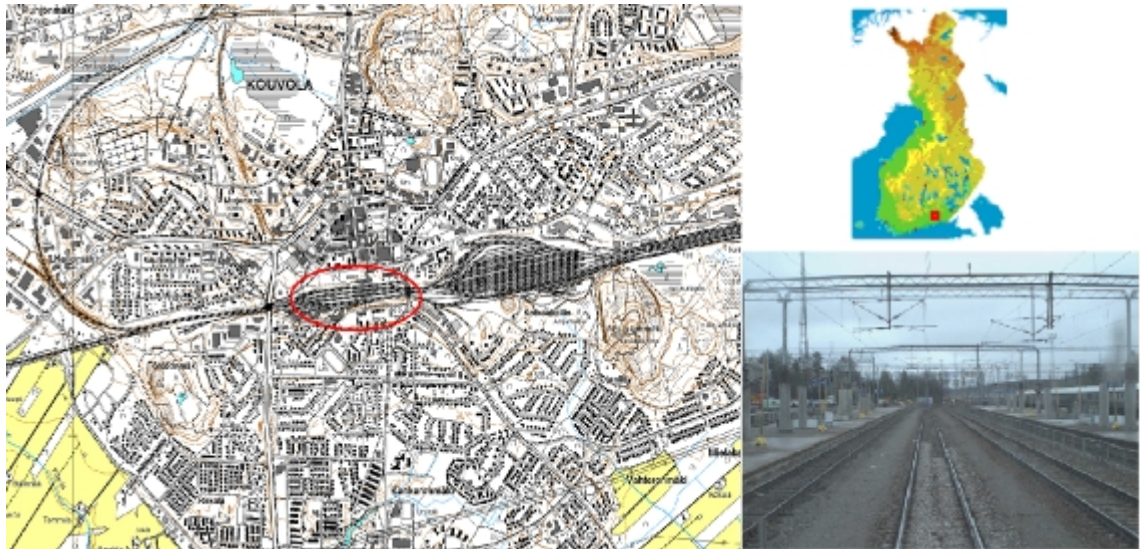
5.6. Kouvolan liikennepaikka

5.6.1. Yleistä

Kouvolan liikennepaikka sijaitsee rataosalla Riihimäki-Kouvola. Kouvolan liikennepaikka jakautuu useaan eri osaan, henkilöliikenteen, lajittelun ja tavaraliikenteen toimintoja tukien. Tässä työssä käsiteltävät rakennustoimenpiteen sijoittuvat Kouvolan henkilöratapihan alueelle noin kilometrillä 191+540, mikä on Kouvolan liikennepaikan osista ensimmäisenä Riihimäen suunnasta tultaessa (kuva 40). Kouvolan henkilöratapihalla on useita raiteita, joista tässä työssä käsiteltävään urakkaan kuuluivat raiteet R004, R005, R006 ja R007. Kouvolan henkilöratapihan kautta kulkee säännöllistä liikennettä lähes 100 junaa vuorokaudessa jakautuen melko tasan henkilö- ja tavarajunien kesken. (tilanne kesäkuu-elokuu 2010) (Liikennevirasto 2010a).

Kouvolan henkilöratapihan laitureiden parannustöihin sisältyi raiteiden massanvaihtoa, uusien laiturielementtien asennustyöt ja laitureiden täytöt, sadevesiputkituksia, kaapeliputkituksia, salaojituksia ja uusien katosten pilarirakenteiden rakentamista, joten tässä työssä käsiteltävä osuus oli vain yksi osa suurempaa urakkaa. Urakassa oli ura-

koitsijan mukaan määrä tehdä raiteille R004, R005, R006 ja R007 massanvaihto osin tuki- ja välikerroksen osalta ja osin pelkän tukikerroksen osalta. Urakoitsija teki välikerroksen massanvaihdon yhden raiteen, R004, osalta yhteensä noin 80 metrin matkalta. Loppujen raiteiden osalta tilaaja jätti välikerroksen vaihdon teettämättä, kun vaihdettava välikerrosmateriaali todettiin riittävän hyväksi. Tästä johtuen välikerrostyöt olivat jääneet ainoastaan yhteen raiteeseen, minkä takia urakassa on teetetty ainoastaan yksi levykuormituskoe. Kohde tehtiin välikerroksen vaihdon osalta vuonna 2009.



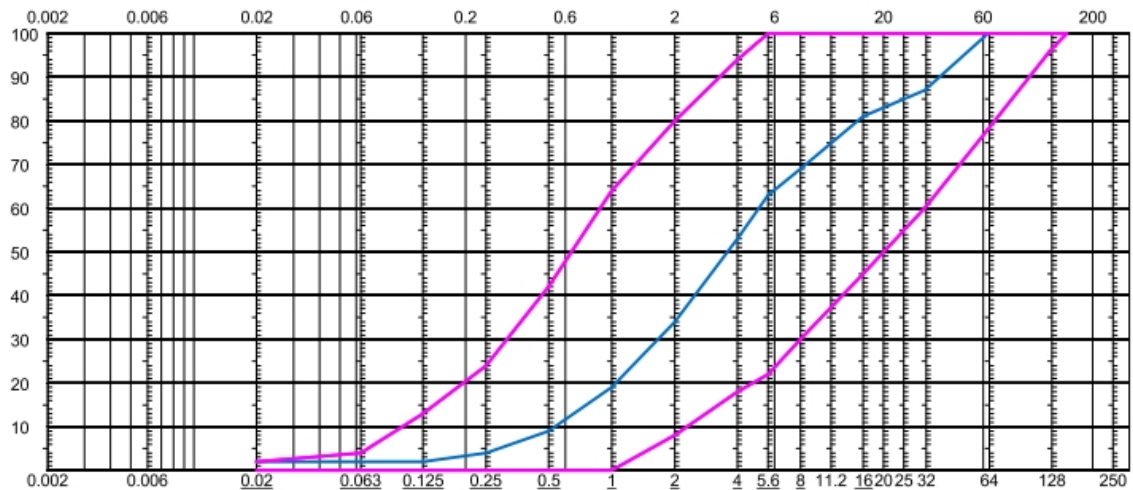
Kuva 40: Kohteen sijainti ja kuva kohteesta km 191+430 itään päin (karttakuvat © Maanmittauslaitos, kuva Liikenneviraston Ratakuvapalvelu)

5.6.2. Pohjaolosuhteet

Kouvolan henkilöratapihan alueelta ei ollut tähän työhön liittyen saatavissa pohjatutkimusaineistoa. Urakan sisältäessä ainoastaan välikerroksen vaihdon, ei pohjamaan laadulla ole juurikaan vaikutusta kohteessa tehtyjen kantavuusmittausten arvoihin, sillä eristyskerroksen voidaan olettaa tiivistyneet vuosien saatossa hyvin tiiviiksi.

5.6.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kohteessa oli edellä esitettyjen päätösten johdosta tehty ainoastaan yksi levykuormituskoe ensimmäisenä tehdyn raiteen alueelta. Vaihdettavan välikerrosmateriaalin laadunvalvonnassa on käytetty materiaalitoimittajan omaa laadunvalvontaa. Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen aineistojen mukaan kohteessa ei ole otettu rakeisuusmääritysnäytteitä rakennetusta valmiista välikerroksesta.



Kuva 41: Kohteessa käytetyn välikerrosmateriaalin rakeisuuskäyrä

Taulukko 23: Kohteen välikerrosmateriaalin vesipitoisuus, materiaalin lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	-	9.2	1.02	hkSr/saGr

* Näyte on materiaalitoimittajan esittämä rakeisuusmääritys toimittamastaan materiaalista.

Taulukko 24: Kohteen välikerroksen päältä tehdyn kantavuusmittauksen tulos

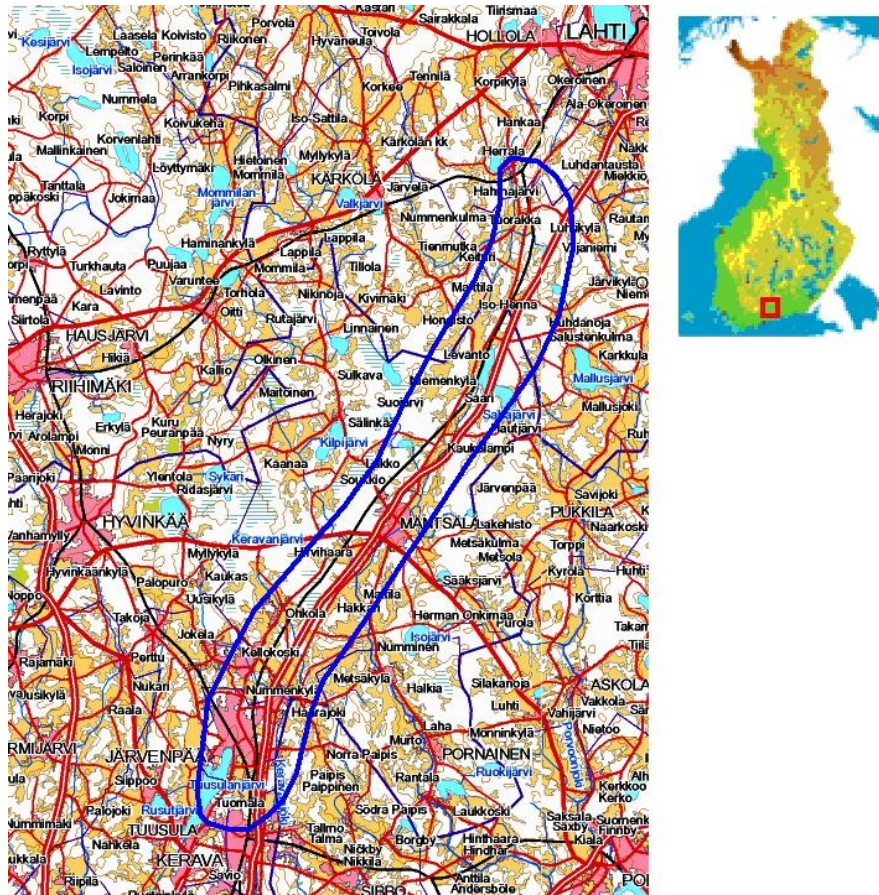
Paalu	Kantavuus		
	E1	E2	E2/E1
640	-	170	-

5.7. Oikorata Kerava-Lahti

5.7.1. Yleistä

Kerava–Lahti-oikorata sijoittuu nimensä mukaisesti Keravan ja Lahden kaupunkien välille. Oikorata erkaantuu pääradasta Tuusulan Tuomaalan kohdalla noin 2 km Keravan liikennepaikan pohjoispuolelta, noin kilometriltä 31+000 ja liittyy Riihimäki-Lahtirataosaan Hollolan Hakosillassa kilometrillä 119+500, noin 10 km Lahden liikennepaikasta länteen (kuva 42). Rataosuuden kokonaispituus on 74 km, josta uuden radan osuutta on 63 km. Rataosuus on kaksiraiteinen, sallittu akselipaino on 30 t ja maksiminopeus radalla on 220 km/h. Radan rakentamistyöt aloitettiin vuonna 2002 ja se avattiin liikenteelle syyskuussa 2006. (Liikennevirasto 2010b; Keinonen 2006)

Kerava-Lahti oikorata paransi valmistuttuaan junaliikenteen välityskykyä itäiseen Suomeen ja samalla vapautti ratakapasiteettia pääradalla, etenkin Helsingistä Tampereen kautta kulkevalle kaukojunaliikenteelle. Rataosalla kulkee yhteensä yli 60 junaa vuorokaudessa, joista pääosa on henkilöjunia ja tavarajunia puolen kymmentä. (Liikennevirasto 2010a)



Kuva 42: Kohteen sijainti (karttakuvat © Maanmittauslaitos)

Oikoratahankkeen urakoista tähän työhön valikoitiin kolme erillistä alusrakenteiden rakentamisen sisältävää urakkaa, MRU 2, MRU 4 ja MRU 5. Näissä kaikissa edellä mainituissa urakoissa alusrakenne rakennettiin yhdistettynä eristys- ja välikerroksena kalliomurskeesta. Oikorata- hankkeessa käytetty kiviainesmateriaali saatiin lähes kokonaan ratalinjan kallioleikkauksista ja murskattiin paikan päällä alusrakenteeseen kelpaavaksi murskeeksi. Tutkimuskohteista MRU 2 sijoittuu rataosan pohjoispäähän noin kilometrivälille 66–70, MRU 4 aivan rataosuuden pohjoispäähän kilometrivälille 77+500–87+300 ja MRU 5 rataosan keskivaiheille noin kilometreille 52–59 päättyen Mäntsälän liikennepaikan eteläpäähän.

5.7.2. Pohjaolosuhteet

Kerava-Lahti oikoradan koko linjauksen pohjaolosuhteet on tutkittu hyvin kattavasti. Ratalinjan kulkiessa suurimmaksi osaksi samassa maastokäytävässä Lahden moottoritien kanssa on moottoritien rakentamisen yhteydessä tehtyjä pohjatutkimuksiakin pystytty osin hyödyntämään arvioidessa ratalinjan pohjaolosuhteita. Ratalinjalla on yleissuunnitteluvaiheessa tehty painokairauksia pääosin kahdenkymmenen metrin välein kallioleikkausosuuksia lukuun ottamatta. Kallioleikkausosuuksilla on tehty lukuisia porakonekairauksia ja otettu kalliosydännäytteitä kiviaineksen kelpoisuusmäärittelyä varten.

Lisäksi rataosalta on tehty joitakin heijarikairauksia ja otettu sekä häiriintymättömiä että häiriintyneitä näytteitä ja tehty pehmeikköosuuksilla joitakin siipikairauksia sekä tutkimuspoikkileikkauksia. Rataosalta yleissuunnitteluvaiheen aikana tehdyn pituusleikkauksen perusteella maasto, jossa rata kulkee, on korkeussuhteiltaan hyvin vaihtelevaa. Paikoin hyvinkin syvät savipehmeiköt ja korkealle kohoavat kallioesiintymät vuorottelevat melko tasaisesti koko ratalinjalla.

MRU 5

MRU 5:n alueelle sijoittuu useampikin pehmeikkö. Kilometrivilillä 53+100-53+850 on 4-10 metriä syvä savipehmeikkö, jonka alla on useamman metrin paksuinen moreenikerros ennen kalliopintaa. Pehmeikön keskivaiheilla rata ylittää Hirvihaaranjoen kilometrivilillä 53+390-53+530. Aivan pehmeikön päitä lukuun ottamatta rata on perustettu Hirvihaaran sillan molemmin puolin paalulaatoille. Pehmeikön päissä on tehty massanvaihdot. Seuraava pehmeikkö sijoittuu ratakilometreille 54+250-54+720. Tällä osuudella savikerroksen paksuus on tasaisesti noin 6 metriä. Savikerroksen alla on moreenia. Saven osalta pehmeiköllä tehtiin massanvaihto. Seuraavalla pehmeiköllä, kilometrivilillä 54+800-55+650, savikerroksen paksuus vaihtelee 5-10 metrin välillä. Tällä pehmeikköosuudella rata on perustettu suurimmaksi osaksi paalulaatoille ja loppupäässä massanvaihdolla. Urakkaosuuden loppupäässä on vielä kaksi 5-10 metrin paksuista savipehmeikköä kilometrivilleillä 57+700-58+070 ja 58+250-58+950. Molemmilla pehmeiköillä rata on perustettu paalulaatoille ensimmäisen pehmeikön ensimmäistä 80 metriä lukuun ottamatta, mihin on tehty massanvaihto.

Suurimmat kallioleikkaukset MRU 5:n alueella sijoittuvat kilometrivilleille 52+500-53+050, 55+650-55+900, 56+250-57+100 ja 58+080-58+230. Näissä kallioleikkauksissa leikkaussyvytydet vaihtelivat parista metristä lähes kymmeneen metriin. Rata- ja alikulkusillat tällä urakkaosuudella sijoittuvat kilometrivilleille 53+390-53+530, 55+580-55+590 ja 56+095-56+140.

MRU 2

MRU 2:n alueella savipehmeiköt ovat pääasiassa kohtuullisen syviä, noin 10 metrin syvyisiä. Kilometrivilleillä 67+540-67+900 savipehmeikön paksuus on 6-8 metriä. Tällä pehmeiköllä rata on perustettu viimeiselle 85 metrin matkalle tehtyä massanvaihtoa lukuun ottamatta paalulaatalle. Kilometrivilillä 68+420-68+670 on hyvin jyrkkäreunainen noin 5-8 m paksuinen savipehmeikkö. Pehmeikön alku ja loppupäähän on tehty lähes 100 metrin matkalta massanvaihdot ja näiden välisellä alueella ratapenger on perustettu paalulaatalle. Seuraavat pehmeiköt kilometrivilleillä 69+280-69+400, 69+480-69+590 ja 69+910-70+100 ovat hyvin matalia 2-5 m syvyisiä savipehmeiköitä, joihin on tehty massanvaihto.

Suurimmat kallioleikkaukset MRU 2:n urakka-alueella sijoittuvat kilometrivilleille 66+270-67+400, 67+950-68+290, 68+930-69+200 ja 69+620-69+900. Leikkaussyvytydet näissä vaihtelivat metristä aina yli kymmeneen metriin. Rata- ja alikulkusillat MRU 2:n urakka-alueella on ainoastaan kilometrivilleillä 67+500-67+545 ja 68+878-68+885.

MRU 4

Rataosan loppupuoliskolle sijoittuva MRU 4:n urakka-alueella pehmeikköalueet ovat muodoiltaan ja syvyyksiltään hyvin vaihtelevia, matalista laakeista pehmeiköistä hyvin jyrkkäreunaisiin syviin pehmeikköihin. Ensimmäinen urakka-alueelle sijoittuva pehmeikkö on kilometrivälillä 78+200-78+380. Tämä pehmeikkö on hyvin laakea 2-3 metriä syvä savipehmeikkö, johon on tehty ratapenkereen perustamiseksi massanvaihto. Kilometrivälillä 78+750-78+950 on hyvin jyrkkäreunainen erittäin syvä yli 20 metrin syvyinen turve- ja savipehmeikkö. Ratapenger on perustettu koko pehmeikön matkalla paalulaatalle. Kilometrivälille 79+850-80+390 sijoittuu laakea, syvimmältä kohdalta noin 10 metrin paksuinen, savipehmeikkö. Pehmeikön alkupäähän on tehty noin 50 metrin matkalle ja loppupäähän noin 150 metrin matkalle massanvaihto. Massavaihtoalueiden välinen alue on perustettu paalulaatalla. Kilometriväleille 82+600-82+900, 83+380-83+450, 83+700-83+930, 86+150-86+220 ja 86+920-87+120 sijoittuvat savipehmeiköt ovat kaikki loivapiirteisiä 2-10 m syvyyisiä savipehmeiköitä, joihin kaikkiin on tehty penkereen perustamiseksi massanvaihdot.

Urakka-alueelle sijoittuvat mittavimmat kallioleikkaukset sijoittuvat kilometriväleille 77+500-78+100, 78+970-79+480, 80+500-80+930, 81+380-81+470, 81+730-82+500, 83+250-83+330, 85+550-86+000 ja 86+220-86+720. Näistä noin puolissa leikkaussyvyys on 10–20 m ja puolessa alle 5 m. Rata- ja alikulkusiltaja tälle urakka-alueelle osuu kilometriväleille 78+360-78+370, 78+945-78+955, 80+390-80+400, 81+690-81+700, 82+850-82+890, 83+910-83+920, 84+215-84+280, 85+420-85+430 ja 86+150-86+160.

5.7.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Kelpoisuusaineistojen osalta oikorata-hankkeessa oli tehty päätös, että silloisen Ratahallintokeskuksen arkistoon ei viedä laatuaineistoa kuin olennaisimmilta osiltaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että oikoradalta on arkistoitu ainoastaan päivitetyt suunnitelmapartat, ratapituusleikkaukset ja kartoitustiedot risteämistä, sisältäen radan poikki kulkevat kolmansien osapuolten sähkö-, tele- ynnä muut vastaavat kaapelit. Näin ollen alusrakenteen kantavuusmittauksia tai materiaalien rakeisuustietoja ei käytännössä ole arkistoitu. (Kivi 2010)

Tässä työssä tarkasteltujen maanrakennusurakoiden 2 ja 5 alueilta esitetyt levykuormituskokeiden tulokset ovat päällysrakenneurakoitsijan laadunvarmistusaineistosta. Päällysrakenneurakoitsija oli teettänyt kantavuusmittauksia valmiista alusrakenteesta ennen tukikerroksen rakentamista. Näiden urakoiden osalta on, muiden laadunvalvonta-aineistojen puuttuessa, seuraavissa taulukoissa esitetty ainoastaan nämä päällysrakenneurakoitsijan teettämien kantavuusmittausten tulokset.

Maanrakennusurakka 4:stä oli, arkistointia koskevasta päätöksestä huolimatta edelleen tallessa kokonainen laatukansiosarja, joka sattui löytymään projektin asiantuntijakonsultilta, joten tämän urakan osalta laadunvalvonta-aineistoa oli saatavissa kiitettävästi. Urakan yhteydessä on tehty levykuormituskokeita hyvin kattavasti koko urakka-

alueelta. Lisäksi seuraavissa taulukoissa on esitetty myös urakassa käytetyn itsemittaavan jyrän tiivistystulosaineistoa. Kohteessa käytetyistä alusrakenteen kiviainesmateriaalista oli kelpoisuuskirjoihin arkistoitu koko murskauksen keskiarvokäyrä sekä valmiista rakenteesta otettujen näytteiden paalukohtaisia rakeisuuskäyriä ja niiden keskiarvokäyrä.

Taulukossa 25 on esitetty maanrakennusurakka 5:n alueelta tehdyt kantavuusmitaustulokset paaluittain sekä esitetty ratapenkereen perustusratkaisut kyseisillä kohdilla. Taulukossa 26 on puolestaan esitetty edellä mainitut tiedot maanrakennusurakka 2:n alueelta. Taulukossa 28 on esitetty maanrakennusurakka 4:ssä tehtyjen kantavuusmitauskokeiden tulokset. Lisäksi taulukossa on esitetty itsemittaavan jyrän tiivistystuloksia samaisilta paaluilta kuin mistä levykuormituskokeitakin on tehty. Itsemittaavan jyrän tiiviyden CMV arvot on jouduttu arvioimaan jyrän tiivistystulosteiden graafisista osioista, joissa tiiviysarvot on ilmoitettu jyräyskaistoittain värikoodein kymmenen yksikön tarkkuudella (katso liite 1). Lisäksi taulukossa on esitetty ratapenkereen perustusratkaisut levykuormituskoeikohtaisesti. Kuvassa 43 ja taulukossa 27 on esitetty maanrakennusurakka 4 kalliomurskeaineuksen rakeisuuskäyriä ja käyristä määritettyjä arvoja. Rakeisuusmäärittelyistä on esitetty koko murskauksen aikainen keskiarvokäyrä sekä joidenkin paalukohtaisten näytteiden rakeisuuskäyriä ja kaikkien paalukohtaisten näytteiden keskiarvokäyrä. Taulukossa 29 on lisäksi esitetty maanrakennusurakka 4:ssä käytetyn itsemittaavan jyrän tulosaineistoa tuloslehdittään. Taulukossa vasemmanpuoleisessa sarakkeessa on kerrottu tuloslehden käsittelemä paaluväli. Seuraavissa sarakkeissa on ilmoitettu prosenttiosuus, kuinka paljon kyseisen tuloslehden käsittelemästä tiivistyspinta-alasta on jäänyt minkäkin CMV arvoasteikon alapuolelle. Oikeanpuoleisimpaan sarakkeeseen on kirjattu koko tuloslehden käsittelemän tiivistysalueen CMV arvon keskiarvo. Taulukon alalaitaan on koottu kuinka suuri prosenttiosuus koko tiivistettävästä alueesta on jäänyt millekin CMV-arvojen väliselle alueelle.

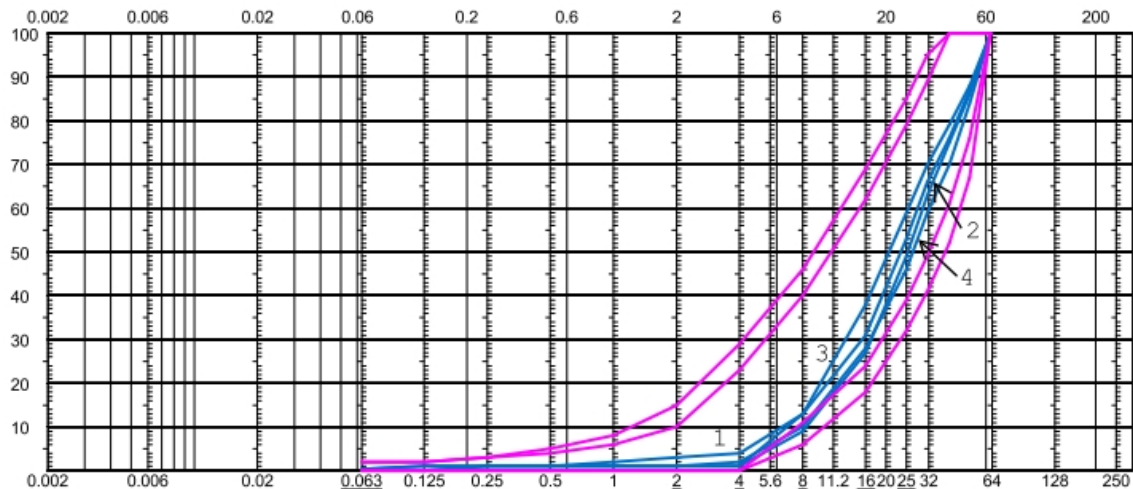
Taulukko 25: Maanrakennusurakka 5:n alueelta välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset

Paalu km+m	Sijainti			Kantavuus			Perustusratkaisu
	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1	
52+450	x			160	235	1.47	Kallioleikkaus
52+500			x	116	159	1.37	Kallioleikkaus
52+550	x			119	152	1.28	Kallioleikkaus
52+600			x	115	172	1.50	Kallioleikkaus
52+650	x			169	258	1.53	Kallioleikkaus
52+700			x	119	154	1.29	Kallioleikkaus
52+750	x			116	169	1.46	Kallioleikkaus
52+800			x	96	163	1.70	Kallioleikkaus
52+850	x			190	312	1.64	Kallioleikkaus
52+900			x	112	154	1.38	Kallioleikkaus
52+950	x			99	250	2.53	Kallioleikkaus
53+000			x	160	221	1.38	Kallioleikkaus
53+060			x	94	164	1.74	Kallioleikkaus
53+140			x	124	164	1.32	Massanvaihto
53+220			x	62	183	2.95	Paalulaatta
53+290			x	99	210	2.12	Paalulaatta
54+600			x	73	200	2.74	Massanvaihto
54+650	x			99	202	2.04	Massanvaihto
54+700	x			158	261	1.65	Massanvaihto
54+750			x	157	251	1.60	Massanvaihto
54+800			x	123	177	1.44	Paalulaatta
54+850	x			99	199	2.01	Paalulaatta
54+900	x			130	257	1.98	Paalulaatta
54+950			x	98	221	2.26	Paalulaatta
55+000	x			194	285	1.47	Paalulaatta
55+050			x	122	203	1.66	Paalulaatta
55+100	x			101	187	1.85	Paalulaatta
55+150			x	150	208	1.39	Paalulaatta
55+200	x			195	276	1.42	Paalulaatta
55+250			x	182	302	1.66	Paalulaatta
55+300	x			181	298	1.65	Paalulaatta
55+350			x	115	217	1.89	Paalulaatta
55+400	x			112	303	2.71	Paalulaatta
55+450			x	139	313	2.25	Paalulaatta
55+500	x			79	225	2.85	Massanvaihto
55+550	x			68	165	2.43	Massanvaihto
55+600			x	79	222	2.81	Massanvaihto
55+650	x			101	242	2.40	Massanvaihto
55+700			x	80	219	2.74	Kallioleikkaus
55+750	x			131	254	1.94	Kallioleikkaus
55+800			x	144	303	2.10	Kallioleikkaus
55+850	x			103	280	2.72	Kallioleikkaus
55+900			x	101	293	2.90	Kallioleikkaus
56+850			x	85	212	2.49	Kallioleikkaus
57+490	x			78	227	2.91	Kallioleikkaus

57+540			x	82	184	2.24	Kallioleikkaus
57+640			x	94	230	2.45	Maanvarainen
57+680	x			82	227	2.77	Maanvarainen
57+730			x	109	251	2.30	Massanvaihto
57+780	x			112	230	2.05	Massanvaihto
57+830			x	132	217	1.64	Paalulaatta
57+880	x			131	265	2.02	Paalulaatta
57+930			x	119	242	2.03	Paalulaatta
58+170			x	138	347	2.51	Kallioleikkaus
58+250			x	165	217	1.32	Paalulaatta
58+310			x	77	170	2.21	Paalulaatta
58+350	x			172	293	1.70	Paalulaatta
58+360			x	64	169	2.64	Paalulaatta
58+370	x			121	241	1.99	Paalulaatta
58+450			x	118	178	1.51	Paalulaatta
58+460			x	69	197	2.86	Paalulaatta
58+550	x			121	177	1.46	Paalulaatta
58+560			x	95	214	2.25	Paalulaatta
58+570			x	158	242	1.53	Paalulaatta
58+650			x	146	203	1.39	Paalulaatta
58+660			x	72	184	2.56	Paalulaatta
58+750	x			118	172	1.46	Paalulaatta
58+760			x	90	197	2.19	Paalulaatta
58+770	x			149	210	1.41	Paalulaatta
58+850			x	146	213	1.46	Paalulaatta
58+860			x	91	180	1.98	Paalulaatta
58+960			x	67	183	2.73	Maanvarainen
59+060			x	71	197	2.77	Maanvarainen
59+160			x	90	262	2.91	Maanvarainen
Keskiarvo					222	2.01	
Maksimi					347	2.95	
Minimi					152	1.28	

Taulukko 26: Maanrakennusurakka 2:n alueelta välikerroksen päältä suoritettujen levykuormituskokeiden tulokset

Paalu km+m	Sijainti			Kantavuus			Perustusratkaisu
	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1	
66+370	x			146	189	1.29	Kallioleikkaus
66+420			x	71	162	2.28	Kallioleikkaus
66+470	x			94	193	2.05	Kallioleikkaus
66+550	x			112	242	2.16	Kallioleikkaus
66+650	x			85	203	2.39	Kallioleikkaus
66+700			x	94	186	1.98	Kallioleikkaus
66+750	x			73	199	2.73	Kallioleikkaus
66+800			x	125	195	1.56	Kallioleikkaus
66+800	x			126	182	1.44	Kallioleikkaus
66+850	x			87	179	2.06	Kallioleikkaus
66+900	x			98	161	1.64	Kallioleikkaus
66+950	x			78	176	2.26	Kallioleikkaus
67+000			x	72	191	2.65	Kallioleikkaus
67+100			x	87	169	1.94	Kallioleikkaus
67+160			x	122	164	1.34	Kallioleikkaus
67+210	x			110	179	1.63	Kallioleikkaus
67+260			x	115	180	1.57	Kallioleikkaus
67+290			x	149	193	1.30	Kallioleikkaus
67+310	x			116	188	1.62	Kallioleikkaus
67+360	x			133	166	1.25	Kallioleikkaus
67+360			x	82	165	2.01	Kallioleikkaus
67+410	x			83	172	2.07	Maanvarainen
67+460			x	80	166	2.08	Maanvarainen
69+620	x			106	258	2.43	Kallioleikkaus
69+670			x	76	203	2.67	Kallioleikkaus
69+720	x			115	236	2.05	Kallioleikkaus
69+820	x			70	171	2.44	Kallioleikkaus
69+870			x	67	187	2.79	Kallioleikkaus
69+920	x			69	165	2.39	Massanvaihto
69+970			x	59	163	2.76	Massanvaihto
70+020	x			78	178	2.28	Massanvaihto
70+070	x			85	186	2.19	Massanvaihto
70+120			x	73	172	2.36	Kallioleikkaus
70+180	x			118	193	1.64	Kallioleikkaus
Keskiarvo					186	2.04	
Maksimi					258	2.79	
Minimi					161	1.25	



Kuva 43: Maanrakennusurakka 4:ssä käytetyn materiaalin rakeisuuskäyriä

Taulukko 27: Maanrakennusurakka 4:ssä käytetyn materiaalin rakeisuuskäyrien vesipitoisuuksia, materiaalin lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	-	4.3	1.45	KaM 2-60
2	-	3.4	1.33	KaM 2-60
3	-	3.2	1.28	KaM 2-60
4	-	4.0	1.13	KaM 2-60

* Näyte 1 on tavaratoimittajan murskauksen aikainen keskiarvokäyrä, näyte 2 on valmiista rakenteesta otettujen näytteiden keskiarvokäyrä, näytteet 3 ja 4 ovat paalukohdaisien näytteiden rakeisuuskäyriä paaluilta 79+800 ja 86+500. Näytteen 4 alueelta on saatu hyviä levykuormitusarvoja ja näytteen 3 alueelta hieman heikompia kantavuuksia.

Taulukko 28: Maanrakennusurakka 4:n alueelta välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset ja itsemittaavan jyrän tiiviystulosteiden graafisista osioista arvioidut CMV- arvot levykuormituskokeiden paaluluvuilta

Paalu km+m	Sijainti			Kantavuus			Itsemittaava Jyrä	Perustusratkaisu	Näytteen	
	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1	CMV-arvo		C _u	C _c
77+500				110	161	1.46	40	Kallioleikkaus		
77+550				59	114	1.93	50	Kallioleikkaus		
77+700				113	182	1.61	40	Kallioleikkaus	3.2	1.33
77+750				67	148	2.21	35	Kallioleikkaus	3.2	1.28
77+900				102	173	1.70	35	Kallioleikkaus		
78+400				123	188	1.53	35	Maanvarainen		
78+590				94	145	1.54	35	Massanvaihto	4.1	1.23
78+800				123	206	1.67	50	Paalulaatta	3.4	1.46
78+900				136	208	1.53		Paalulaatta		
79+000				98	180	1.84		Kallioleikkaus		
79+100				137	193	1.41	45	Kallioleikkaus		
79+200				96	165	1.72	35	Kallioleikkaus		

79+400				94	169	1.80	50	Kallioleikkaus		
79+600				149	222	1.49	50	Maanvarainen	3.4	1.17
79+800				120	171	1.43	25	Maanvarainen	3.8	1.04
80+050				157	210	1.34	45	Paalulaatta		
80+250				111	186	1.68	50	Massanvaihto		
80+450				110	177	1.61	35	Maanvarainen	3.5	1.22
80+650				154	236	1.53	35	Kallioleikkaus		
80+850				136	208	1.53	50	Kallioleikkaus		
81+000				96	171	1.78	50	Maanvarainen		
81+000				78	152	1.95	50	Maanvarainen		
81+200				115	180	1.57	40	Avokallio		
81+300				108	186	1.72	40	Maanvarainen		
81+400				89	161	1.81	35	Kallioleikkaus	3.6	1.17
81+500				97	176	1.81	50	Kallioleikkaus	4.0	0.66
81+700				67	168	2.51	40	Silta		
82+100				119	191	1.61	50	Kallioleikkaus		
82+300				130	181	1.39		Kallioleikkaus		
82+400				122	195	1.60		Kallioleikkaus		
82+550				146	179	1.23	50	Maanvarainen		
82+730				127	201	1.58	45	Massanvaihto	4.0	1.37
83+140			x	133	189	1.42	40	Avokallio		
83+200			x	128	170	1.33	35	Maanvarainen		
83+340	x			125	169	1.35	40	Kallioleikkaus	3.8	1.09
83+500	x			85	116	1.36	35	Kallioleikkaus		
83+540	x			105	152	1.45	35	Maanvarainen		
83+800			x	125	193	1.54	45	Massanvaihto		
84+050	x			126	191	1.52		Maanvarainen		
84+300			x	159	225	1.42	45	Maanvarainen	3.8	1.19
84+570			x	129	175	1.36	50	Maanvarainen		
84+965		x		125	203	1.62	45	Maanvarainen		
85+000				128	205	1.60	50	Maanvarainen		
85+100				101	182	1.80	45	Maanvarainen		
85+300				110	194	1.76		Maanvarainen	3.6	1.30
85+500				111	178	1.60		Maanvarainen		
85+700				106	186	1.75		Kallioleikkaus		
85+900				109	196	1.80		Kallioleikkaus		
86+020				79	139	1.76		Kallioleikkaus		
86+070	x			135	178	1.32	45	Maanvarainen		
86+520			x	165	251	1.52	50	Kallioleikkaus	4.0	1.13
86+840	x			131	189	1.44	40	Maanvarainen		
86+930				113	171	1.51	50	Massanvaihto		
86+1040			x	134	191	1.43	40	Massanvaihto		
87+000				117	174	1.49	35	Massanvaihto		
87+080				123	177	1.44	45	Massanvaihto		
Keskiarvo					182	1.60	43			
Maksimi					251	2.51	50			
Minimi					114	1.23	25			

Taulukko 29: Maanrakennusurakka 4:n itsemittavan jyrän tulosaineistoa tulosteittain kirjattuna

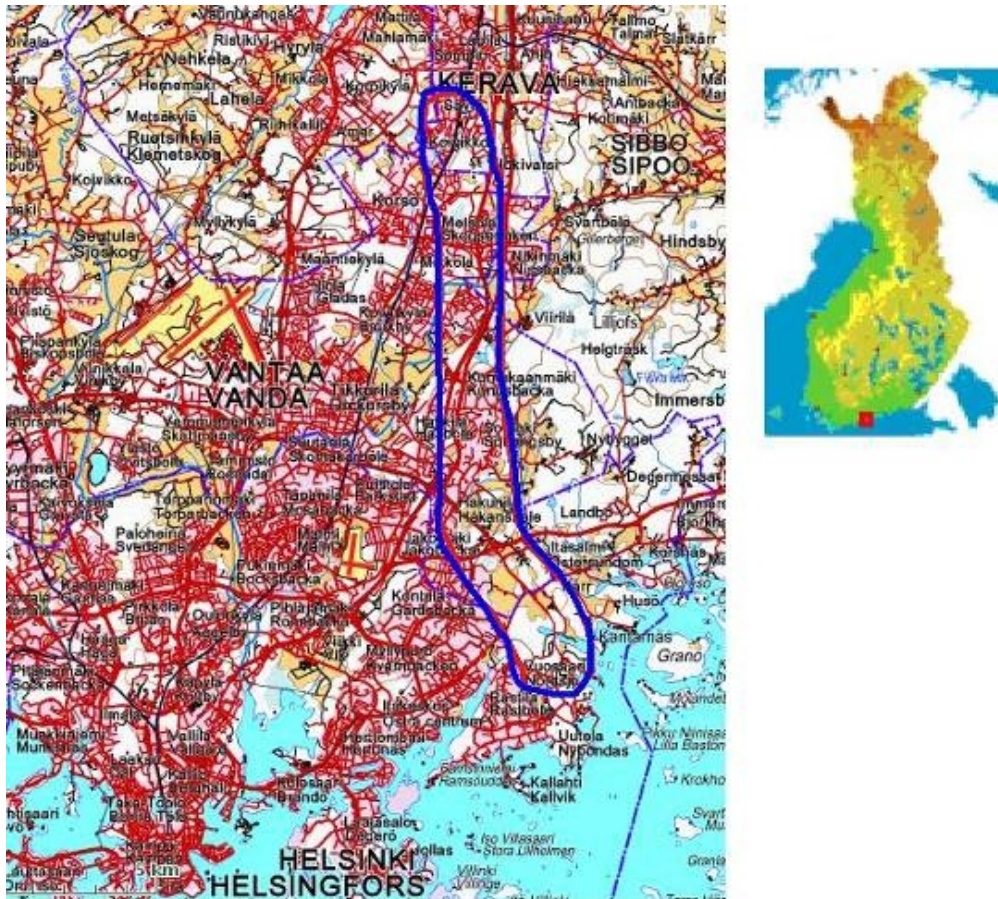
kmv	% pinta-alasta jäänyt esitetyn CMV arvon alle					Tiivistettävän alueen keskiarvo
	<20	<30	<40	<50	<60	
77+500- 77+620	0	3	40	99		40
77+620- 77+740	0	17	69	99		36
77+740- 77+860	1	24	91	99		33
77+860- 77+980	6	48	99	100		29
77+980- 78+100	1	19	77	100		35
78+100- 78+220	0	13	69	99		37
78+240- 78+325	1	6	44	91		40
78+320- 78+440	0	6	57	97		39
78+440- 78+560	0	7	57	100		38
78+560- 78+680	1	19	68	99		36
78+680- 78+800	0	6	29	92		42
78+920- 79+020	0	10	55	90		39
79+100- 79+160	0	4	36	95		42
79+180- 79+262	0	18	61	100		37
79+260- 79+380	0	10	64	92		38
79+380- 79+500	0	2	21	60		48
79+500- 79+620	0	7	32	69		44
79+620- 79+740	0	2	34	92		42
79+750- 79+853	0	18	57	93		38
79+860- 79+980	2	13	53	100		38
80+040- 80+160		7	39	95	100	41
80+180- 80+300		4	38	94	100	41
80+360- 80+480		28	64	96	100	36
80+480- 80+600		49	94	100	100	30
80+600- 80+720		14	62	99	100	37
80+714- 80+834		9	61	98	100	38
80+830- 80+950		9	56	96	100	39
80+960- 81+080		3	21	72	98	45
81+080- 81+200		8	38	91	100	41
81+200- 81+320		5	46	92	100	40
81+320- 81+440		19	75	95	100	36
81+460- 81+580	0	3	26	93		43
81+580- 81+648	0	10	68	97		37
81+660- 81+743	7	16	44	86		40
81+740- 81+860	0	2	16	67		47
81+880- 82+000	0	1	11	61		48
82+000- 82+120	1	11	29	74		44
82+120- 82+240	0	2	23	59		47
82+500- 82+620	2	6	19	49		49
82+700- 82+810	0	4	22	87		44
82+910- 83+030		1	53	99	100	39
83+030- 83+150		7	48	96	100	40
83+150- 83+270		9	50	96	100	39
83+270- 83+390		6	46	92	100	40
83+390- 83+510		9	56	99	100	39
83+510- 83+630		8	54	97	100	39
83+630- 83+750		3	35	88	100	42
83+750- 83+870		9	40	93	100	41

84+252- 84+361		2	44	97	100	40
84+372- 84+492		6	41	86	100	41
84+498- 84+618		4	37	86	100	42
84+628- 84+748		4	34	86	100	42
84+774- 84+859		3	26	84	99	44
84+857- 84+917		11	49	87	100	40
84+913- 85+033		5	51	95	100	40
85+099- 85+219		8	49	96	100	39
85+164- 85+284		2	42	90	100	41
86+040- 86+100		9	41	87	100	41
86+120- 86+330		1	14	53	93	49
86+140- 86+200		16	40	85	100	40
86+332- 86+452		2	13	65	96	47
86+452- 86+572		14	44	72	86	43
86+573- 86+693		33	54	86	99	36
86+693- 86+802		6	34	71	100	44
86+806- 86+920		8	39	84	99	42
86+921- 87+037		5	52	89	99	40
87+037- 87+157		7	48	93	100	40
87+163- 87+273		9	56	97	100	38
						ka 40
koko alue	0.3 %	9.5 %	36.6 %	42.1 %	10.7 %	max 49
CMV-arvoväli	0-20	20-30	30-40	40-50	50-60	min 29

5.8. Vuosaaren rata

5.8.1. Yleistä

Vuosaaren satamarata sijaitsee Vuosaaren sataman ja Keravan välillä (kuva 44). Rataosuus on 19 kilometriä pitkä, minkä lisäksi siihen kuuluu Vuosaaren sataman päässä kuuden raiteen ratapiha. Radan ja ratapihan yhteenlaskettu pituus on noin 21 km. Rata yhdyttyä päärataan Keravan rautatieaseman eteläpuolella. Rata kulkee Savioilta Vuosaaren päin mentäessä 13,5 km pitkässä Savion tunnelissa, jonka eteläinen suuaukko on Porvoonväylän eritasoliittymän itäpuolella. Radan eteläpäässä Porvarinlahden ylittävän sillan pohjoispuolella rata kulkee 0,6 km pituisessa Labbackan tunnelissa. Radalla on varsinaista avorataosuutta Keravan päässä ja runsaat kaksi kilometriä Porvoonväylän ja Itäväylän välimaastossa. Rataosa on yksiraiteinen ja sähköistetty. Rata rakennettiin vuosina 2003-2008 ja otettiin käyttöön marraskuussa 2008. Rataosalla liikennöi ainoastaan tavarajunaliikennettä noin 20 junaa vuorokaudessa (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a). Vuosaaren satamaradan rakentaminen oli osa Vuoli- projektia, jossa rakennettiin Vuosaaren satamaan liikenneyhteydet, sisältäen tie-, rautatie- ja meriväyläyhteydet.



Kuva 44: Kohteen sijainti(karttakuvat © Maanmittauslaitos)

Vuosaaren ratahankkeen urakoista tähän työhön valikoitiin kolme erillistä alusrakenteiden rakentamisen sisältävää urakkaa, MRU 1, MRU 2 ja TU 7. Näissä kaikissa edellä mainituissa urakoissa alusrakenne rakennettiin yhdistettynä eristys- ja välikerroksen kalliomurskeesta. Tutkimuskohteista MRU 1 sijoittuu aivan rataosan Vuosaaren sataman puoleiseen päähän sisältäen käytännössä Porvarinlahden eteläpuolelta alkavan ratapihaosuuden. Maanrakennusurakka 2 sisältää rautatien osalta radan eteläisen avorataosuuden, joka alkaa Labbackan tunnelin pohjoiselta suuaukolta (km 48+540) ja päättyy Savion tunnelin eteläiselle suuaukolle (km 46+600). Tunneliurakka 7 sisälsi radan alusrakenteen rakentamisen koko Savion tunnelin osalta.

MRU 1:n alueella alusrakenteen paksuus vaihtelee kalliroleikkausosuuksilla 350–1450 mm välillä ja maaleikkausosuudella alusrakenteen kerrospaksuus on 1750 mm. MRU 2:ssa yhdistetyn eristys- ja välikerroksen kerrospaksuus on 1750 mm.

Maanrakennusurakka 2:n urakoitsijalta saatujen tietojen perusteella rakennekerrokset olisi rakennettu 600–700 mm kerroksissa. Tiivistys tehtiin 10–12 tonnia painavalla yksivalssisellä jyrällä käyttäen tiivistystyön apuna vettä. Jyrässä ei ollut urakoitsijan mukaan tiiviyshmittaria. Tiivistyskertamäärät oli urakoitsijan mukaan ohjeistettu etukäteen tilaajan puolelta, joten tiivistyskokeita ei tehty. Yhdistetyssä eristys- ja välikerroksessa käytettiin alapäästä katkaistua kalliomursketta. Urakoitsijan mukaan ensimmäiset tiivistysylityskerrat ajettiin ilman täryä "kuohumisen" estämiseksi, ja loput yli-

tyskerrat ajettiin täryllä. Materiaali ajettiin penkereeseen valmiin rakenteen päältä au-toilla, vaikkakin niillä oli yleensä vaikeuksia liikkua rakenteen päällä.

TU 7:ssä rakennekerrokset koostuivat noin 400–500 mm paksuisesta louhintapinnan tasauserroksesta ja 600 mm paksuisesta yhdistetystä eristys- ja välikerroksesta. Eristys- ja välikerros rakennettiin urakoitsijan (Kari 2010) mukaan kahdessa kerroksessa. Koh-teessa käytettiin jyräykseen itsemittaavaa jyrää. Itsemittaavalla jyrällä saatuja tuloksia ei voitu pitää luotettavina alusrakenteeseen asennettujen värinänvaimennusmattojen aiheut-tamien häiriöiden sekä jyräyksen yhteydessä eristys- ja välikerrosmateriaalin pinnan irtoamisen takia.

5.8.2. Pohjaolosuhteet

Maanrakennusurakka 1 sijaitsee suurimmaksi osaksi kallioleikkauksessa. Aivan sata-man puoleisessa päässä rata on rakennettu maanvaraisesti. Tunneliurakka 7 sijaitsee ko-konaan kalliotunnelissa. Näin ollen molemmissa edellä mainituissa kohteissa rata on rakennettu erittäin kantavan pohjalle.

Maanrakennusurakka 2:n alueella pohjatutkimuksia on tehty pääasiassa heijari- ja puristinheijarikairauksin 20 metrin välein sijoitetuista tutkimuspoikkileikkauksista. Peh-meikköosuuksilla tutkimuksia on täydennetty paino-, CPT-U- ja siipikairauksin. Lisäksi on otettu useita häiriintyneitä ja häiriintymättömiä näytteitä sekä tehty saven stabiloita-vuuskokeita. Maa- ja kallioleikkausosuuksilla kallion pinta on määritetty pora-konekairauksin. Rataosuus sijoittuu korkeus- ja pohjasuhteiltaan kolmelle erityyppiselle alueelle.

Paaluvälillä 2160–3010 rata ylittää Österängenin erittäin syvän pehmeikön. Tällä pehmeiköllä päällimmäisenä on noin 10–12 m paksuinen savikerros, jonka alla on vielä 20–25 metrin syvyyteen ulottuva silttikerros. Näiden kerrosten alla on pehmeikön sy-vimmällä kohdalla noin paaluvälillä 2200–2400 vielä hiekka/sorakerrostuma ennen poh-jamoreenia. Paalulta 2600 lähtien pehmeikkö mataloituu selvästi ja maasto muuttuu si-vukaltevaksi, jossa savipehmeikön paksuus vaihtelee 2–4 m välillä.

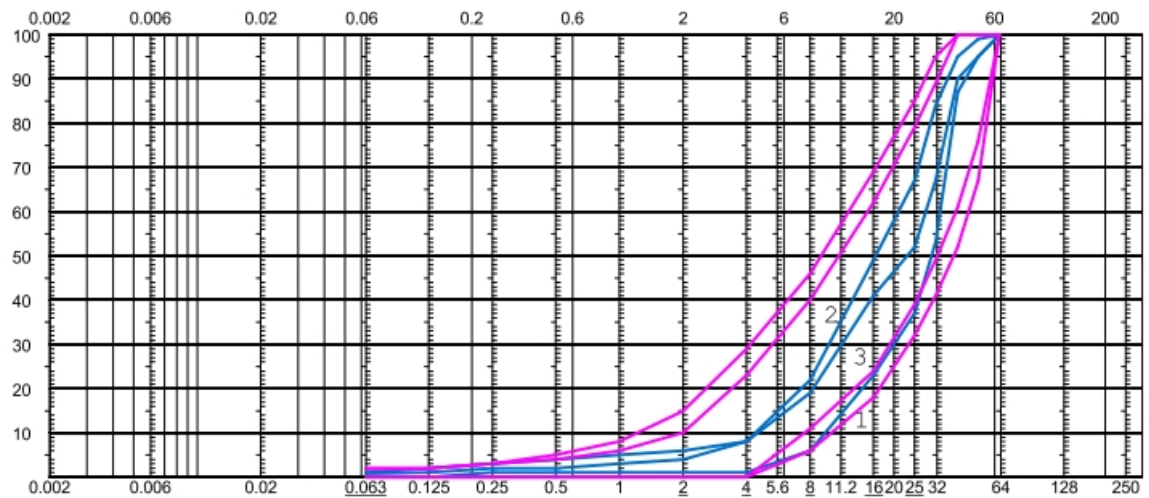
Paaluvälillä 3010–3540 rata kulkee kallioleikkauksessa. Kallioleikkausosuuden jäl-keen rata kulkee jyrkästi syvenevän pehmeikön yli. Pehmeiköllä pohjamaan päällim-mäisenä kerroksena on noin 10 m paksuinen savikerros, jonka alla on 10 metriä tiiviim-pää savea tai silttiä. Näiden kerrosten alla on osittain 1–2 metrin paksuinen hiekkakerros ennen tiivistä pohjamoreenia. Paalulta 3800 rata kulkee jälleen hyvin sivukaltevassa maastossa, penkereen sijoittuessa osittain savileikkaukseen ja osittain moreeni- ja kal-lioleikkaukseen. Paalulta 4150 lähtien rata painuu maaleikkaukseen lähestyttäessä Savi-on tunnelin eteläpäästä. Pohjanvahvistustoimenpiteinä tällä avorataosuuden pehmeiköillä on käytetty paalulaattaa, massanvaihtoa ja syvästabiloointia.

5.8.3. Kohteen kelpoisuuskirjatiedot

Maanrakennusurakka 1 kelpoisuuskirjojen mukaan radan alusrakenteen laadunvarmis-tuskokeita on tehty paaluvälillä 0–1. Maanrakennusurakka 2:n kelpoisuuskirjoissa on

radan alusrakenteen laadunvalvonta-aineistoa kantavuusmittausten osalta ainoastaan paaluväliltä 3270–3465 (kilometriviäli 47+430–47+235). Kyseisellä osuudella rata kulkee kallioleikkauksessa. Tunneliurakka 7 sisältää Vuosaaren satamaradan Savion rata-tunneliosuuden pohjoiselta suuaukolta Keravan Saviolta (noin km 32+500) eteläiselle Porvoonväylän suuaukolle (noin km 46+600). Urakan yhteydessä radan yhdistetystä eristys- ja välikerroksesta on tehty laadunvarmistuskokeita kilometriviäliltä 32+720–46+280. Rakennekerroksissa käytettyjen materiaalien laadunvarmistuksessa on käytetty materiaalitoimittajien omaa laadunvalvontaa. Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen aineistojen mukaan kohteessa ei ole otettu rakeisuusmääritysnäytteitä rakennetuista penkereistä.

MRU 1



Kuva 45: Maanrakennusurakka 1:ssä käytetyn materiaalin rakeisuuskäyriä

Taulukko 30: Maanrakennusurakka 1:ssä käytetyn materiaalin lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

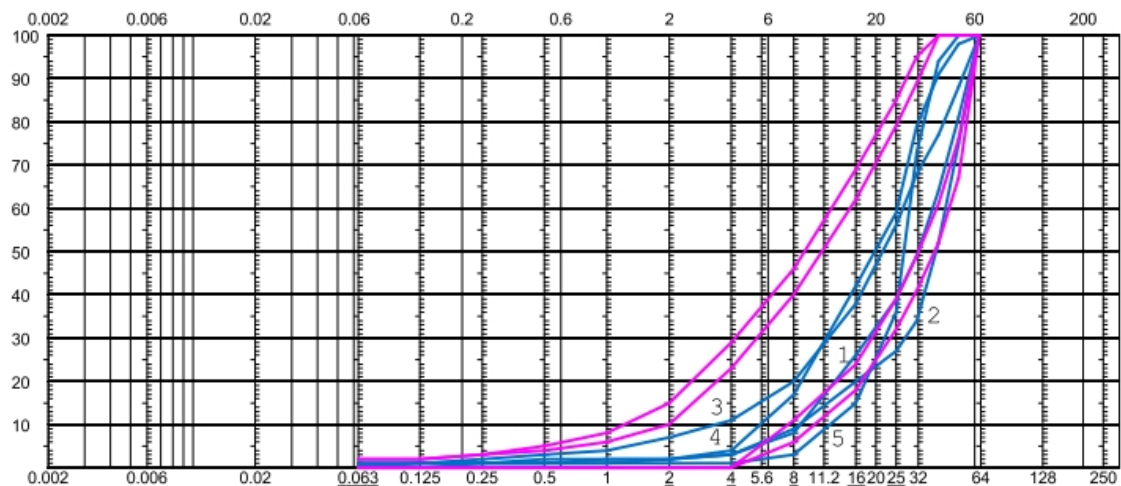
Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	-	3.8	1.31	KaM 0/60
2	-	4.9	1.05	KaM 0/60
3	-	6.3	1.04	KaM 0/60

* Kaikki näytteet ovat murskauksen aikaisia rakeisuusmäärityksiä tavaratoimittajan omasta laadunvalvonnasta

*Taulukko 31: Maanrakennusurakka 1:ssä välikerroksen päältä tehtyjen levykuormitus-
kokeiden tulokset*

Paalu	Kantavuus		
	E1	E2	E2/E1
160	76	183	2.41
170	70	229	3.28
190	115	261	2.26
270	73	181	2.49
280	49	175	3.61
320	69	191	2.77
330	83	203	2.43
380	80	199	2.51
440	77	223	2.88
450	67	209	3.13
480	82	212	2.57
500	54	196	3.65
500	90	239	2.66
550	123	283	2.31
560	87	212	2.45
590	75	208	2.76
610	56	203	3.65
620	77	196	2.56
630	26	130	5.09
630	75	223	2.99
670	61	179	2.93
680	105	280	2.66
710	66	225	3.39
750	54	168	3.13
750	78	205	2.62
780	54	164	3.05
800	74	221	2.98
810	81	212	2.62
830	63	178	2.81
860	107	214	2.00
860	47	178	3.76
880	78	201	2.60
880	53	173	3.29
920	86	193	2.24
940	91	212	2.33
950	61	165	2.71
990	63	176	2.80
1000	69	217	3.16
Keskiarvo		203	2.88
Maksimi		283	5.09
Minimi		130	2.00

MRU 2



Kuva 46: Maanrakennusurakka 2:ssa käytetyn materiaalin rakeisuuskäyriä

Taulukko 32: Maanrakennusurakka 2:ssa käytetyn materiaalin lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

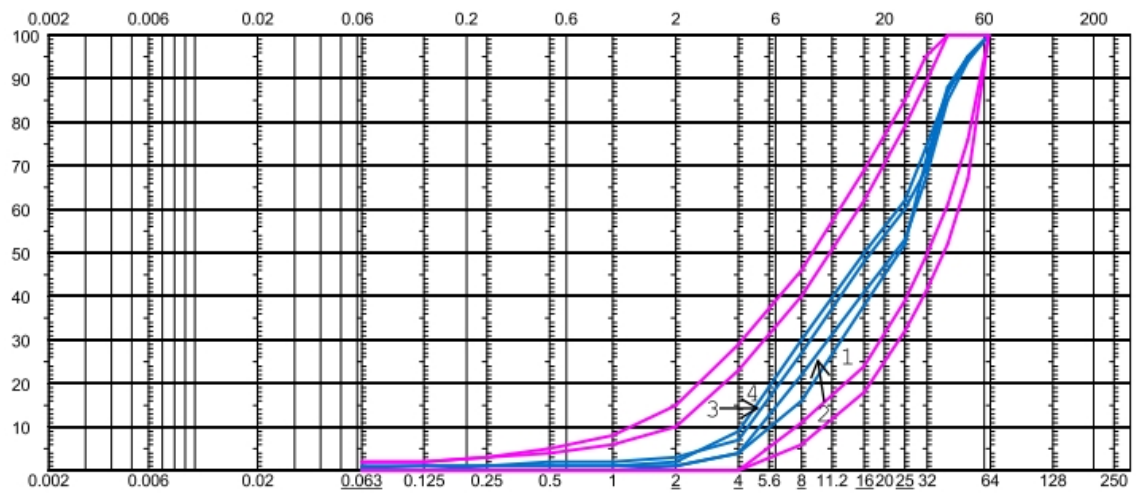
Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	-	4.6	1.09	KaM 2/60
2	-	5.1	2.00	KaM 2/60
3	-	8.9	1.50	KaM 2/60
4	-	4.8	0.89	KaS 2/56
5	-	2.4	1.45	KaS 2/56

* Kaikki näytteet ovat murskauksen aikaisia rakeisuusmäärittämiä tavaratoimittajan omasta laadunvalvonnasta

Taulukko 33: Maanrakennusurakka 2:ssa välikerroksen päältä tehtyjen kantavuusmittausten tulokset

				Kantavuus		
Paalu	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1
3270		x		66	177	2.7
3365		x		64	153	2.4
3417	x			94	150	1.6
3465		x		71	177	2.5
Keskiarvo					164	2.30
Maksimi					177	2.70
Minimi					150	1.60

TU 7



Kuva 47: Tunneliurakka 7:ssä käytetyn materiaalin rakeisuuskäyriä

Taulukko 34: Tunneliurakka 7:ssä käytetyn materiaalin vesipitoisuus, lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO/CEN-ISO
1	0,20	5.1	0.94	KaS 2/56
2	0,10	6.3	0.90	KaS 2/56
3	0,20	6.0	0.74	KaS 2/56
4	0,20	5.6	0.68	KaS 2/56

* Kaikki näytteet ovat murskauksen aikaisia rakeisuusmäärittämiä tavaratoimittajan omasta laadunvalvonnasta

*Taulukko 35: Tunneliurakka 7:ssä valmiin alusrakenteen päältä tehtyjen levykuormitus-
kokeiden tulokset*

Paalu		Sijainti			Kantavuus		
km	m	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1
32	970		x		111	337	3.04
33	000			x	149	324	2.17
33	000		x		157	347	2.21
33	000				112	269	2.40
33	070				107	255	2.38
33	600			x	20	30	1.51
34	000		x		17	24	1.38
34	070		x		174	329	1.89
34	450		x		30	44	1.48
34	700			x	129	269	2.09
34	850		x		29	40	1.38
35	200			x	44	76	1.72
35	410		x		120	285	2.38
35	640			x	34	47	1.39
35	725			x	88	203	2.31
35	800		x		119	251	2.11
35	800			x	46	163	3.55
36	000				92	303	3.30
36	100		x		41	75	1.82
36	330				176	415	2.36
36	440				168	242	1.44
36	500		x		103	265	2.58
36	500	x			113	262	2.32
36	840				222	478	2.15
36	900		x		126	290	2.30
36	900			x	73	189	2.59
37	300		x		109	273	2.50
37	700		x		32	47	1.46
37	700	x			20	46	2.30
37	800		x		20	29	1.45
37	900		x		16	26	1.63
38	000		x		21	111	5.29
38	300			x	19	29	1.53
38	300		x		18	33	1.83
38	700		x		94	232	2.47
39	100	x			62	201	3.24
39	100		x		70	232	3.31
39	500		x		42	178	4.24
39	780			x	32	127	3.97
39	965		x		68	206	3.03
40	000	x			65	169	2.60
40	000		x		53	162	3.06
40	000	x			46	144	3.12
40	000		x		56	172	3.07
40	400		x		82	290	3.53
40	800		x		97	242	2.49
40	800			x	22	141	6.39
40	800			x	63	191	3.03

41	200		x		97	290	2.99
41	600	x			48	242	5.04
41	600		x		86	228	2.65
42	000		x		32	66	2.07
42	400			x	23	36	1.56
42	400		x		26	45	1.73
42	800		x		15	25	1.72
43	200		x		23	41	1.78
43	200	x			30	54	1.80
43	600		x		51	71	1.38
44	000		x		27	53	2.00
44	000			x	32	46	1.42
44	130			x	38	171	4.5
44	130		x		112	269	2.40
44	500		x		92	242	2.63
44	900			x	76	191	2.51
44	900		x		96	236	2.46
45	450	x			48	189	3.94
45	480		x		86	239	2.78
46	105		x		80	232	2.90
46	125		x		53	225	4.25
46	125		x		63	218	3.46
46	280				105	193	1.84
Keskiarvo						179	2.56
Maksimi						478	6.39
Minimi						24	1.38

Taulukko 36: Tunneliurakka 7:ssä yhdistetyn eristys- ja välikerroksen ensimmäiseksi rakennetun kerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden tuloksia

	Paalu	vas	kl	oik	Kantavuus			syvyys
					E1	E2	E2/E1	
32	720		x		152	332	2.18	kv-0.95
37	200				68	159	2.34	kv-0.85
38	070		x		106	299	2.82	kv-0.85
38	630		x		72	236	3.28	kv-0.85
39	010		x		102	281	2.75	kv-0.85
39	385	x			60	230	3.83	kv-0.85
41	560				100	255	2.55	kv-0.85
41	580				43	150	3.50	kv-0.85
44	300				109	262	2.40	kv-0.85
44	500				127	347	2.74	kv-0.85
45	290				68	199	2.92	kv-0.85
45	450				71	138	1.95	kv-0.85
45	550				52	186	3.58	kv-0.85
45	766		x		96	306	3.19	kv-0.95
45	766		x	x	93	179	1.93	kv-0.95
45	766	x	x		93	182	1.95	kv-0.95
45	766		x		45	165	3.68	kv-0.95
45	866		x		108	283	2.62	kv-0.95
45	866	x	x		104	172	1.66	kv-0.95
45	866		x	x	95	167	1.75	kv-0.95
45	966		x		103	255	2.48	kv-0.95
45	980				88	137	1.56	kv-0.85
46	068		x		80	255	3.19	kv-0.95
46	168		x		64	232	3.63	kv-0.95
Keskiarvo						225	2.69	
Maksimi						347	3.83	
Minimi						137	1.56	

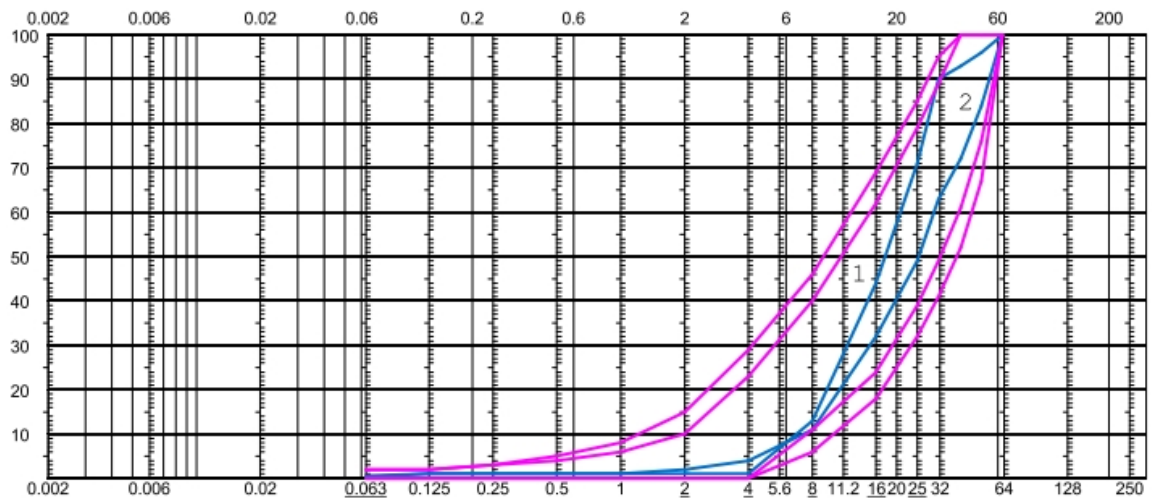
5.9. Yksipihlajan liikennepaikka

5.9.1. Yleistä

Yksipihlajan liikennepaikka sijaitsee Kokkolan kaupungissa kilometrillä 555+778 (kuva 48). Yksipihlajaan johtava rata erkaantuu Seinäjoki-Oulu radasta Kokkolan liikennepaikalla. Kokkolan liikennepaikalta Yksipihlajan liikennepaikalle on noin 6 km. Rata on Kokkolasta Yksipihlajaan yksiraiteinen jakautuen liikennepaikalla kuudelle raiteelle. Rataosalla on ainoastaan tavarajunaliikennettä, joita vakituisesti kulkee 10–15 junaa vuorokaudessa (tilanne huhtikuu-kesäkuu 2010) (Liikennevirasto 2010a).

Yksipihlajan väliratapiha palvelee Kokkolan syväsatamaa ja alueen suurteollisuutta. Väliratapihan raiteet ovat olleet liian lyhyitä Seinäjoki–Oulu-radalla liikkuvien junien käsittelyyn kokonaisina Yksipihlajassa. Hankkeessa jatkettiin väliratapihan raiteita mahdollistamaan 925 m pituisten junien liikennöinti sekä sähköistettiin rata Kokkolan ratapihalta Yksipihlajan väliratapihalle.

käytetty materiaalitoimittajien omaa laadunvalvontaa. Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen aineistojen mukaan kohteessa ei ole otettu rakeisuusmääritysnäytteitä rakennetusta valmiista penkereestä.



Kuva 49: Kohteessa käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät

Taulukko 37: Kohteessa käytetyn materiaalin vesipitoisuus, lajittuneisuutta ja käyryyttä kuvaavat tunnusluvut sekä maalajimääritys

Näyte	Vesipitoisuus [%]	C _U	C _C	Maalaji GEO
1	2.90	3.1	0.94	KaM
2	0.77	4.1	0.97	KaM 3/64

* Näytteet ovat kahden eri tavaratoimittajan esittämät rakeisuusmääritykset toimittamastaan materiaalista.

Taulukko 38: Kohteessa tehtyjen kantavuusmittausten tulokset

Paalu		Sijainti			Kantavuus		
km	m	vas	kl	oik	E1	E2	E2/E1
555+	205	x			146	253	1.73
555+	167			x	119	241	2.03
555+	125	x			84	175	2.08
555+	075		x		84	175	2.08
Keskiarvo						211	1.98
Maksimi						253	2.08
Minimi						175	1.73

5.10. Kohteissa ilmenneitä ongelmia

Kaitjärven liikennepaikan lisäraiteiden rakentamisessa ongelmia havaittiin materiaalin tiivistyvyyden ja "sitoutuvuuden" kanssa. Kohteessa alusrakenne rakennettiin kokonaan luonnonmateriaaleista. Kohteessa urakoitsijan teettämät tiiviiden laaduntarkkailumittaukset, taulukot 18 ja 19, osoittivat rakenteen olevan laatuvaatimukset täyttävä. Eristyskerroksen päältä saatujen tiiviyssasteiden keskiarvo on 95,7 ja pieninkin yksittäinen arvo 92,3. Valmiin välikerroksen päältä mitattujen tiiviyssasteiden keskiarvo on 97,1 ja pienin

yksittäinen arvo 92,5. Silmä määräisesti tarkasteltuna rakenne ei kuitenkaan tyydyttänyt tilaajaa, jonka jälkeen kohteessa tehtiin lisätutkimuksia. Puolueettoman tahon tekemiä tiiviys- ja kantavuustuloksia on esitetty taulukossa 20. Näiden tulosten perusteella rakenteen tiiviys- ja kantavuusvaatimukset eivät täyttyneet. Rakenteen kantavuus- ja tiivistävyysongelmat johtunevat eristyskerroksen osalta materiaalin liiallisesta hienoainesmäärästä ja välikerroksen osalta materiaalin epätavallisen suuresta hiekkapitoisuudesta. Kelpoisuuskirjoissa esitetyt materiaalitoimittajan rakeisuuskäyrät eroavat kohdullisen paljon valmiista alusrakenteesta otettuihin rakeisuusmäärittämiin verrattuna.

Kerava-Lahti Oikorata- hankkeen yhteydessä tehdyissä kalliomurskemateriaalien tiivistämiskokeissa oli ongelmia saavuttaa levykuormituskokein mitattuja kantavuus- ja tiiviysvaatimuksia ($E_2=180 \text{ MN/m}^2$ ja $E_2/E_1=2$). Tehtyjen levykuormituskoe tulosten E_2 arvot olivat vaihdelleet 78–225 MN/m^2 välillä ja E_2/E_1 suhteet välillä 2,14–3,96. Yhdistetyssä eristys- ja välikerroksessa käytetty materiaali oli rakeisuudeltaan ohjekäyrien mukainen, mutta raekokosuhte D_{60}/D_{10} oli noin 5, eli ohjearvoa 6 huonompi. Murskauksen yhteydessä materiaalia oli leikattu 3 mm seulalla. Tuolloin käytössä ollut kalliomurskeen ohjealue salli alle 2 mm rakeita enintään 5 %, kun uusissa InfraRYL mukaisissa ohjealuekäyrissä sallitaan alle 2 mm rakeita enintään 10 %. Kerrosten rakentamistekniikka kerrospengerryksenä, 500 mm kerrospaksuudet ja tiivistystyö 8 t jyrällä maksimissaan 8 ylityskertaa jyräys-suuntaa vaihdellen, todettiin tuolloin parhaaksi tavaksi saada tiivistettävä kerros mahdollisimman homogeeniseksi. Tuolloin asiaa pyrittiin korjaamaan muuttamalla materiaalin poisleikkaavaa silmäkokoa 2 mm:iin, jolla pyrittiin saamaan materiaalien rakeisuuskäyrien C_U arvot vaatimukset täyttäväksi, ≥ 6 . Lisäksi muutettiin projektikohtaisiksi tiiviysvaatimuksiksi $E_{2\text{keskiarvo}} \geq 160 \text{ MN/m}^2$ ja suhde $E_2/E_1 \leq 3$. (Suomalainen 2003) Hankkeen yhden urakan kelpoisuuskirjoissa esitettyjen rakeisuusnäytteiden mukaan C_U arvoja ei kyetty parantamaan, mutta esitettyjen levykuormitustulosten perusteella alkuperäisetkin tiiviys- ja kantavuusvaatimukset olisivat lähes täyttyneet.

Kerava-Lahti Oikoradalla ongelmia havaittiin aluksi myös ratajohtopylväiden harustien kiristämisen yhteydessä. Hankkeen projektinjohdossa toimineen Kiven (2010) mukaan haruksia kiristettäessä ratapenkereeseen asennetut ankkurit irtosivat penkereestä. Tämän kaltainen ongelma vaikuttaisi johtuvan materiaalin heikosta sitoutuvuudesta, mikä todennäköisesti on seurausta materiaalin lajittuneisuudesta.

Vuosaaren radalla alusrakenteessa käytetty katkaistu kalliomurskemateriaali aiheutti ongelmia tiivistymättömyydellään. Hankkeen kahden eri urakoitsijan mukaan, tiivistettäessä eristys- ja välikerroksen materiaalia täryllä se niin sanotusti "kuohui", eli pinta ei tiivistynyt kunnolla vaan pintarakeet jäivät irtonaisiksi. Itsemittaavilla jyrillä täryttäen tiivistettäessä tiivistysarvot huononivat, juuri pinnan irtoamisen takia.

TTY:llä käynnissä olevissa tutkimuksissa ja tässä työssä tarkasteltujen kalliomurskemateriaaleista rakennettujen alusrakenteiden kantavuusmittaustuloksista on havaittavissa, että huolellisesti kalliomurskeilla rakennetuissa penkereissä levykuormituskokeilla mitatut InfraRYL:n mukaiset E_2 kantavuusvaatimukset on suhteellisen helposti saa-

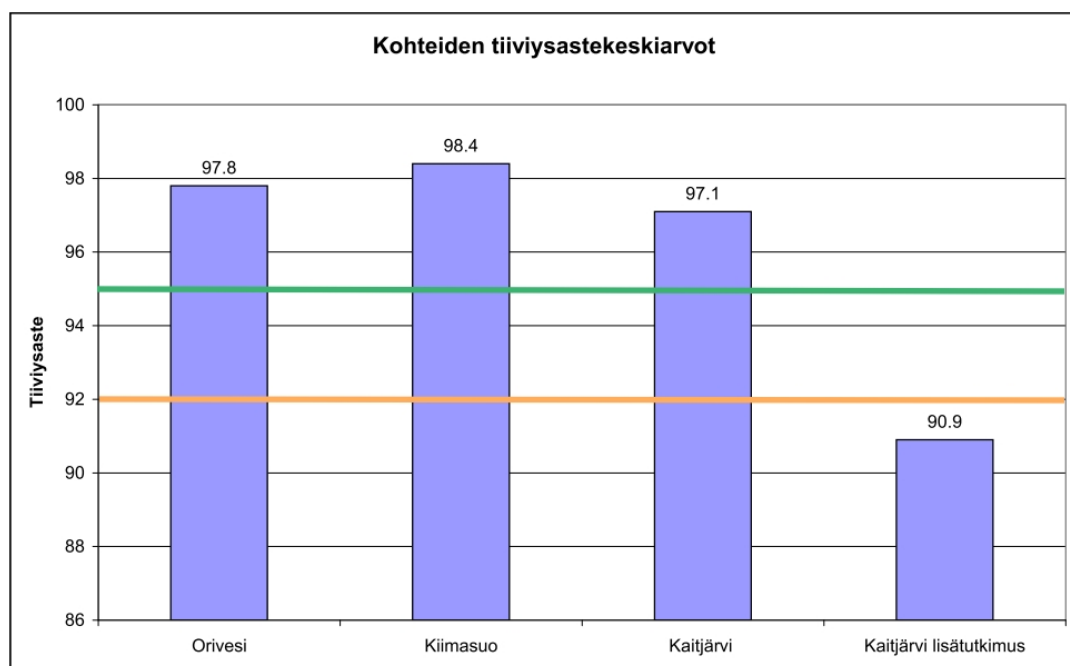
vutettavissa, mutta tiiviyttä kuvaava moduulisuhdevaatimus $E2/E1$ jo huomattavasti vaikeammin ja osalla materiaaleista jopa mahdoton saavuttaa.

6. TULOSTEN KÄSITTELY

6.1. Tiiviys

Kelpoisuuskirjoissa esitettyjen tietojen perusteella tässä työssä käsiteltävistä kohteista kolmessa on valmiiden alusrakennekerrosten tiiviyyksiä valvottu suorilla tiiviymittausmenetelmillä. Oriselän ja Kiimasuon oikaisuissa sekä Kaitjärven liikennepaikan lisäraideurakoissa rakenteen tiiviydet mitattiin säteilymittauslaitteella (Troxler). Lisäksi Kaitjärvellä lisämittausten yhteydessä tiiviyyksiä mitattiin myös vesivolymetrikokein.

Kuvassa 50 on esitetty tiiviysmittausten keskiarvotulokset näiden kolmen kohteen osalta joissa alusrakenteen tiiviyttä on mitattu suorilla tiiviymittausmenetelmillä. Kuvassa on lisäksi esitetty vihreällä viivalla välikerroksen tiiviysasteiden keskiarvon 95 % tiiviysvaatimus ja oranssilla viivalla yksittäisen näytteen 92 % tiiviysvaatimus. Kuvassa näkyy selvästi, että rakenteelle asetetut tiiviysvaatimukset täyttyivät kaikissa kohteissa. Kaitjärvellä tehdyissä lisätutkimuksissa havaittiin kuitenkin selviä eroavaisuuksia alkuperäisiin tiiviysmittauksiin verrattuna, eivätkä tiiviysvaatimukset enää lisätutkimuksissa täyttyneet. Kuvassa esitetty Kaitjärven lisätutkimusten tiiviysmittausten keskiarvo on mitattu vesivolymetrillä, mutta mistään mittausmenetelmästä johtuvasta vaihtelusta ei ole kyse, sillä samanaikaisesti myös Troxler- laitteella oli määritetty rakenteen tiiviysasteet, joiden keskiarvoksi oli saatu 91,1 %.



Kuva 50: Tarkasteltujen kohteiden välikerrosten päältä suorilla tiiviymittausmenetelmillä mitattujen tiiviyyksien keskiarvot.

Tehtäessä alusrakenteen tiiviysmittauksia kerralla suuremmalta alueelta, tulosten täsmällisyys heikkenee. Suurimmaksi ongelmaksi muodostuu rakenteen epähomogeenisuus. Mitattavan rakenteen materiaali on aina hieman erilaista eri kohdissa tutkittavaa aluetta. Tästä johtuen myös materiaalin maksimikuivairtotehiys on erisuuruinen eri kohdissa. Tutkittavan materiaalin maksimikuivairtotehiyttä määritettäessä joudutaan tekemään jonkinasteisia keskiarvomäärittäyksiä, jotka edustaisivat mahdollisimman hyvin koko tutkittavaa aluetta. Täysin oikeiden koetulosten saamiseksi pitäisi Proctor-sullonnat tehdä jokaisesta koekohdasta otetusta näytteestä erikseen, mikä käytännössä on taloudellisesti kannattamatonta. (Ali-Runkka 2010) Tiiviysarvoa määritettäessä yksittäisen mittauspisteen tietoja verrataan tähän "maksimi"kuivairtotehiyden arvoon. Todellisuudessa, tämä määritetty maksimikuivairtotehiys ei vastaakaan suurimmassa osassa mittauspisteitä juuri sen mitattavan pisteen materiaalin maksimikuivairtotehiyttä. Tästä johtuen tiiviysmittausten tuloksissa saattaa olla useamman prosenttiyksikön heittoa, jompaan kumpaan suuntaan sen todellisesta tiivysasteesta. Osittain tämä tulosten vääristymä kompensoituu yksittäisille mitaustuloksille sallituilla hieman pienemmillä tiivysvaatimuksilla.

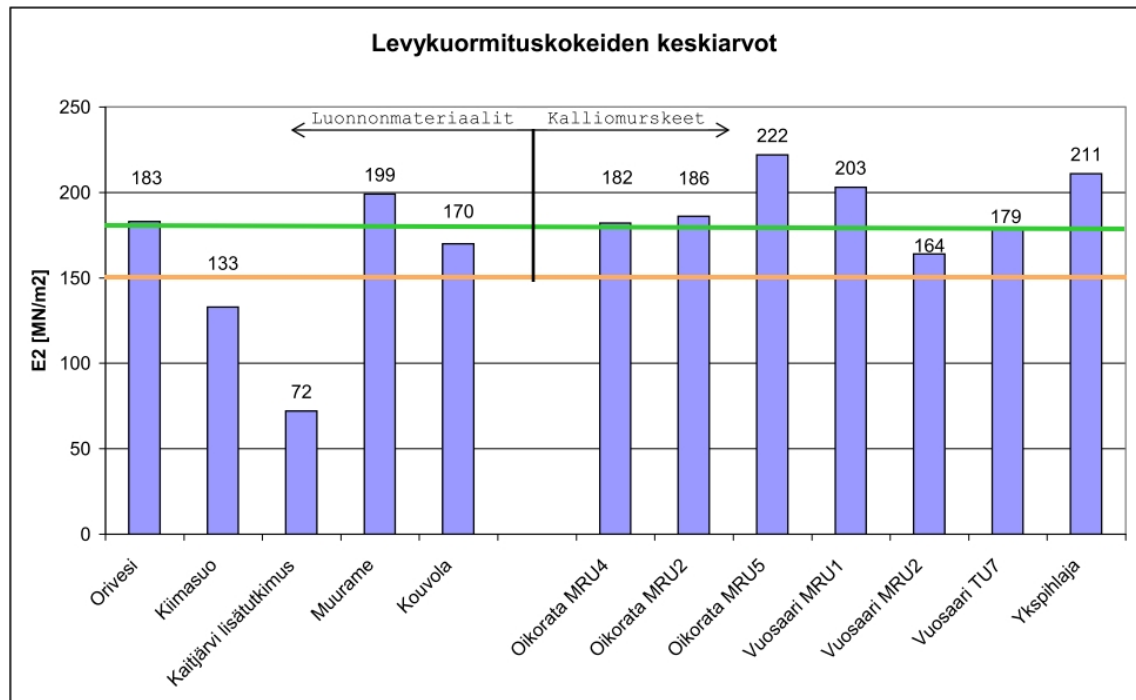
Tiiviyskokeet tehdään nykyään pääasiassa aina Troxler-laitteilla. Troxler-mittaukset ovat volymetri-mittauksiin verrattuna selvästi käytännöllisempiä ja nopeampia suorittaa ja ne soveltuvat myös karkeampien materiaalien tiiviyksien mittaamiseen volymetria paremmin. Ali-Runkan (2010) mukaan paksumpien rakenteiden tiiviyksiä mitataan Troxlereilla pääasiassa suorasäteilymenetelmällä mahdollisimman syvältä, maksimissaan 300 mm syvyydeltä. Pintamittauksia käytetään usein, jos tiivistettävä kerros on ollut ohut ja työ on saatava nopeasti tehtyä, mikä yleensä johtuu urakoitsijan kovasta kiireestä päästä rakentamaan uutta kerrosta mitattavan rakenteen päälle.

Tiiviyksiä määritettäessä olisi hyvin tärkeää ottaa mitattavasta kohteesta näytteitä etukäteen, jotta tutkittavan rakenteen materiaalin maksikuivairtotehiydet saataisiin määritettyä parannetuin Proctor-kokein ennen rakenteen tiiviysmittauksia. Tällöin vertailuarvoina käytettävät maksimikuivairtotehiydet pystytään syöttämään esimerkiksi Troxler-laitteeseen etukäteen, jolloin tulokset tulisivat kerralla oikein. Ali-Runkan (2010) mukaan laadunvalvontamittajilla on usein ongelmana, ettei työmaa ole erinäisistä syistä johtuen toimittaneet ennakkonäytteitä mittajille. Tällöin mitausten tekijä arvioi silmämääräisesti vertailuarvon ja tekee kokeet työmaalla näihin arvioituihin arvoihin verrattuna. Tällöin mitattavan rakenteen materiaalista tehdään Proctor-kokeet jälkikäteen ja korjataan työmaalla saadut arvot näiden tulosten perusteella oikeiksi. Tämänkaltaisen menettely tietysti aina hidastaa lopullisten tulosten saamista, mikä etenkin kiireellisillä työmailla olisi ensisijaisen tärkeää.

6.2. Kantavuus

Kantavuusmittauksia on kelpoisuuskirjojen perusteella tehty jokaisessa tässä työssä tarkastelluista kohteista. Kaikki edellä mainitut mittaukset on tehty levykuormituskokein.

Kuvassa 51 on esitetty tutkimuskohteissa välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden toisen kuormitusvaiheen E_2 tulosten keskiarvot kohteittain. Kuvassa vihreällä poikkiviivalla on esitetty InfraRYL mukainen E_2 :n keskiarvoille asetettu 180 MPa:in vaatimus ja oranssilla poikkiviivalla yksittäiselle tulokselle sallittu 150 MPa:in raja. Kuvan 51 viidessä vasemmanpuoleisessa kohteessa, Orivesi, Kiimasuo, Kaitjärvi, Muurame ja Kouvola, alusrakenne on tehty luonnonmateriaaleista ja Yksipihjalassa, Oikoradan ja Vuosaren radan kohteissa yhdistetty eristys- ja välikerros on tehty kalliomurskeesta.

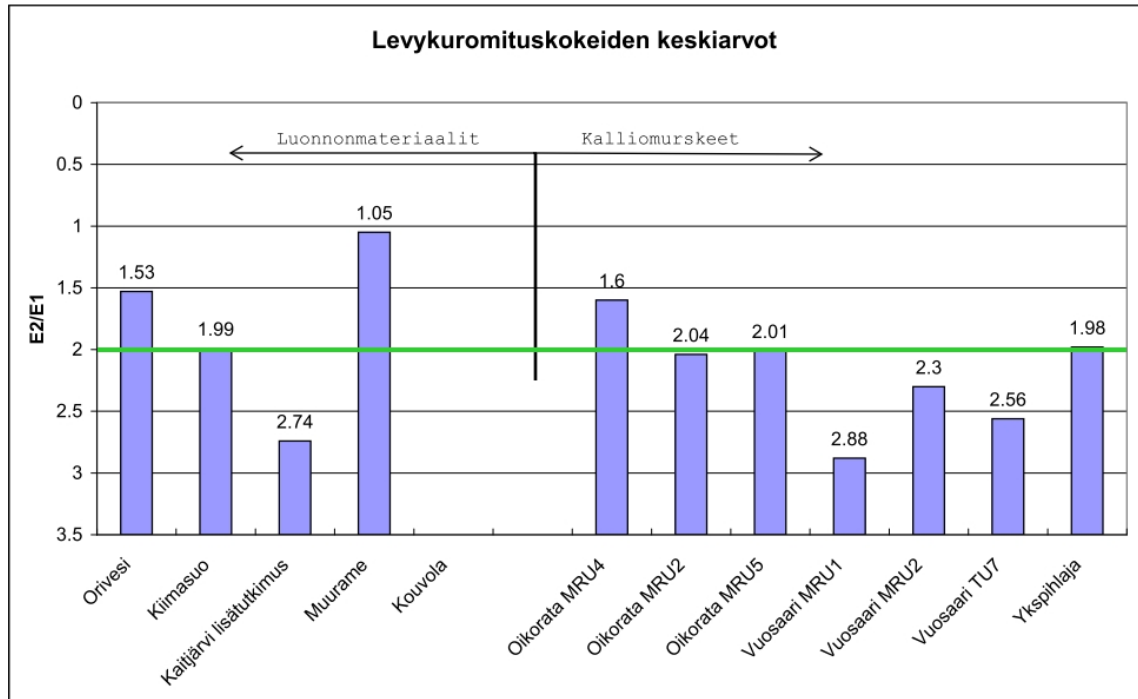


Kuva 51: Tarkasteltujen kohteiden välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden toisen kuormitusvaiheen E_2 keskiarvotulokset kohteittain

Kuvasta 51 on selvästi havaittavissa, että kalliomurskerakenteilla vaatimusten mukaiset kantavuusarvot saavutetaan lähes poikkeuksetta. Luonnonmateriaaleilla vaatimusten mukaisten kantavuusarvojen täyttyminen on jonkin verran hankalammin saavutettavissa ja on hyvin paljon riippuvainen käytettävän materiaalin ominaisuuksista. InfraRYL:in rakeisuusvaatimusten mukaisissakin materiaaleissa pystyy olemaan materiaaleja, joilla ei edes pystytä saavuttamaan vaadittavia kantavuuksia. Tällaisilla materiaaleilla tulisi ensisijaisesti tarkastella niiden tiiviysasteita suorilla tiiviymittausmenetelmillä. Verrattaessa esimerkiksi Kiimasuon laadunvalvontatuloksia kuvista 50 ja 51, sen tiiviysaste täyttää selvästi laatuvaatimukset, mutta kantavuusarvot jäävät vaatimusten alle. Kantavuusmittauksilla tehdyillä laadunvarmistusmittauksilla rakenteen tiiviyyttä kuvaakin paremmin toisen (E_2) ja ensimmäisen (E_1) kuormitusvaiheen moduuliarvojen suhde E_2/E_1 .

Kuvassa 52 on esitetty tutkimuskohteissa välikerrosten päältä tehtyjen levykuormituskokeiden toisen (E_2) ja ensimmäisen (E_1) kuormitusvaiheen moduuliarvojen suhteita.

den keskiarvotulokset kohteittain. Lisäksi kuvassa on vihreällä poikkiviivalla esitetty InfraRYL:ssä välikerrokselle asetettu kaavan 6 mukainen vaatimus $E_2/E_1 \leq 2$. Oikoradalla oli muutettu projektikohtaiseksi tiiviysvaatimukseksi $E_2/E_1 \leq 3$, jota ei kuvassa ole kuitenkaan erikseen esitetty.



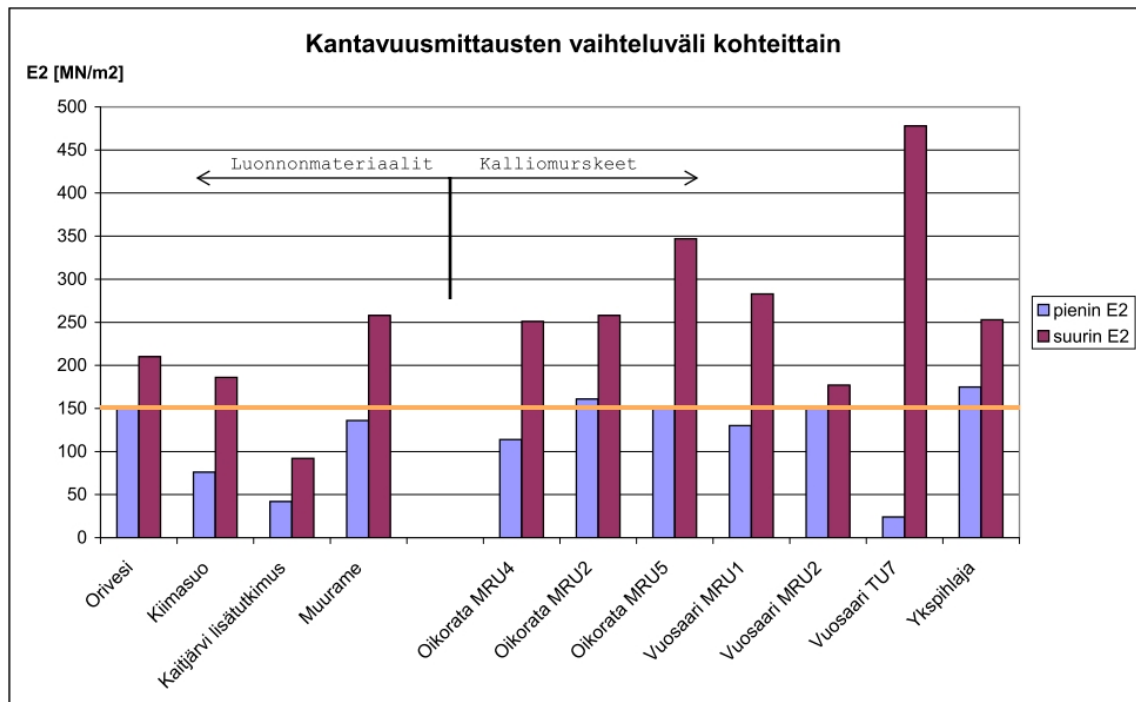
Kuva 52: Kohteissa välikerrosten päältä tehtyjen levykuormituskokeiden toisen ja ensimmäisen kuormitusvaiheen moduuliarvojen suhteen E_2/E_1 keskiarvotulokset kohteittain

Kuvasta 52 on nähtävissä, että luonnonmateriaaleilla rakennetuissa kohteissa, rakenteiden välikerrosten päältä levykuormituskokeilla tehtyjen tiivysmittausten keskiarvot täyttävät pääosin niille asetetut vaatimukset. Ainoastaan Kaitjärvellä vaatimukset eivät täyttyneet, jossa muutenkin havaittiin materiaalin tiivistymisongelmia. Lisäksi kuvassa 52 esitetyt tulokset korreloivat hyvin kuvassa 50 esitettyjen suorilla tiiviydenmittausmenetelmillä saatujen tiivysasteiden kanssa, vaikkakaan laajamittaisempien johtopäätösten teko näiden tulosten perusteella ei ole perusteltua, pienen otannan takia.

Kalliomurskekohteissa tiivysvaatimukset näyttävät täyttyneen Ykspihlajassa ja Oikoradan kohteissa, vaikka Oikoradalla sallittiin kantavuussuhteet aina arvoon 3 asti. Vuosaaren radan tässä työssä tarkastelluista kohteista yhdessäkään eivät InfraRYL:in mukaiset tiiviyden laatuvaatimukset täyttyneet. Yhtäläisyyksiä näiden kohteiden välille löytyy kun tarkastellaan kalliomurskeista rakennettujen kohteiden rakeisuuskäyriä ja levykuormituskokeilla saatuja tiivysarvoja. Näistä on havaittavissa, että Ykspihlajassa ja Oikoradalla käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät ovat huomattavasti roikkuvampia kuin Vuosaaren urakoissa käytettyjen kalliomurskemateriaalien.

Kuvassa 53 on esitetty kohteittain välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden pienimmät ja suurimmat toisen kuormitusvaiheen arvot. E_2 arvojen vaihtelu koh-

teiden välillä ja etenkin kohteiden sisällä, on pääasiassa hyvinkin suurta, yleisesti yli 100 MN/m^2 . Noin puolessa kohteista kaikki yksittäisetkin levykuormitustulokset täyttivät kuitenkin laatuvaatimukset.



Kuva 53: Kohteissa välikerroksen päältä tehtyjen levykuormituskokeiden toisen kuormitusvaiheen E2 tulosten suurimmat ja pienimmät arvot kohteittain esitettynä

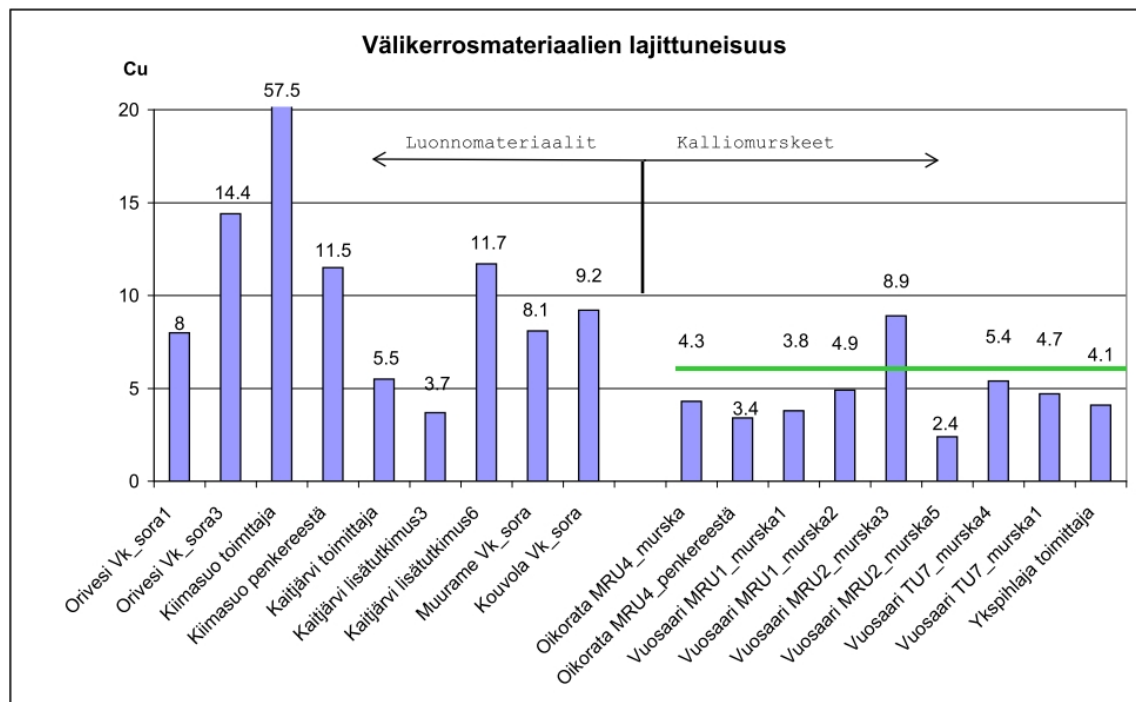
6.3. Rakeisuusjakautuma

Kohteissa käytettyjen materiaalien rakeisuusjakautumien esittämisessä kelpoisuuskirjoissa oli jonkin verran vaihtelua. Joidenkin kohteiden kelpoisuuskirjoissa välikerrokselle ja eristyskerrokselle esitetään useamman eri materiaalin rakeisuuskäyriä, esimerkiksi tässä työssä tarkastelluista kohteista Orivesi, jolloin on mahdoton tietää missä kohtaa mitään materiaalia on käytetty tai onko kaikkia materiaaleja edes käytetty. Rakeisuuskäyrät ovat lisäksi usein tavarantoimittajan laatimia rakeisuusmäärittäjiä, jotka saattavat olla useamman kuukauden tai jopa vuoden vanhoja kohteen rakentamiseen verrattuna. Tällöin on mahdoton tietää onko juuri kyseistä materiaalia käytetty kohteessa ja kuinka hyvin esitetty rakeisuuskäyrä edes vastaa toimitetun materiaalin rakeisuutta, josta tässä työssä hyvänä esimerkkinä Kaitjärvi.

Suuremmissa kohteissa, kuten Vuosaari ja Oikorata, joissa kiviainesten toimittaja tuottaa jatkuvasti omaa laadunvalvontaa on materiaalien rakeisuusmäärittäjiä esitetty kelpoisuuskirjoissa erittäin hyvin. Lisäksi joissakin kohteissa kuten Oikoradan MRU 4:ssä oli otettu paalukohtaisiakin näytteitä, joista oli määritetty rakeisuudet. Tällaisissa hyvin dokumentoidussa kohteissakin yksityiskohtaisen tiedon saaminen on mahdotonta. Tällöin ongelmaksi muodostuu tiedon yhdistäminen sellaisten materiaalien kesken, joiden rakeisuus on määritetty murskauksen yhteydessä ja niiden joiden rakeisuus on mää-

ritetty rakenteesta otetusta näytteestä. Tällöin joudutaan kuitenkin käyttämään keskiarvomäärittelyksiä ja tulokset ovat enemmänkin suuntaa antavia. Esimerkiksi Oikoradalla, kiviaines murskattiin paikan päällä linjauksesta saadusta kiviaineksesta ja varastoitiin kasoihin mahdollisimman oikeaoppisesti lajittumisen estämiseksi (Kivi 2010). Kasoilta materiaali kuljetettiin työmaille ratarakenteisiin, joista sitten otettiin myös paalukohtaisia näytteitä. Tällaisen helposti lajittuvan materiaalin, kuten kalliomurske, rakeisuus muuttuu jonkin verran varastoinnin, kuljetuksen, pengertämisen ja tiivistämisen seurauksena. Tämä käy selvästi ilmi esimerkiksi kuvan 43 käyrien 1 ja 2 muodoista sekä kuvista 54 ja 55. Etenkin kuvista 43 ja 54 on nähtävissä, että penkereestä otetut näytteet ovat lajittuneempia, johtuen vähäisemmästä hienorakeisen aineksen määrästä.

Kuvassa 54 on esitetty materiaalien lajittuneisuutta kuvaavat C_U -arvot (kaava 10) kohteiden kelpoisuuskirjoissa esitettyjen materiaalien rakeisuuskäyristä määritettyinä ja kuvassa 55 on esitetty samojen materiaalien rakeisuuskäyrien käyryyksiä kuvaavat C_C -arvot (kaava 11). Kuvassa 54 on lisäksi vihreällä poikkiviivalla esitetty InfraRYL:ssä kalliomurskemateriaaleille asetettu $C_U \geq 6$ vaatimus. Kuvissa on pyritty mahdollisuuksien mukaan esittämään jokaisesta kohteesta kahden tai useamman materiaalin tai erillisenäytteen lajittuneisuuksia ja käyryysarvoja kuvaamaan kohteiden alusrakenteissa käytetyissä materiaaleissa esiintyvää vaihtelua.

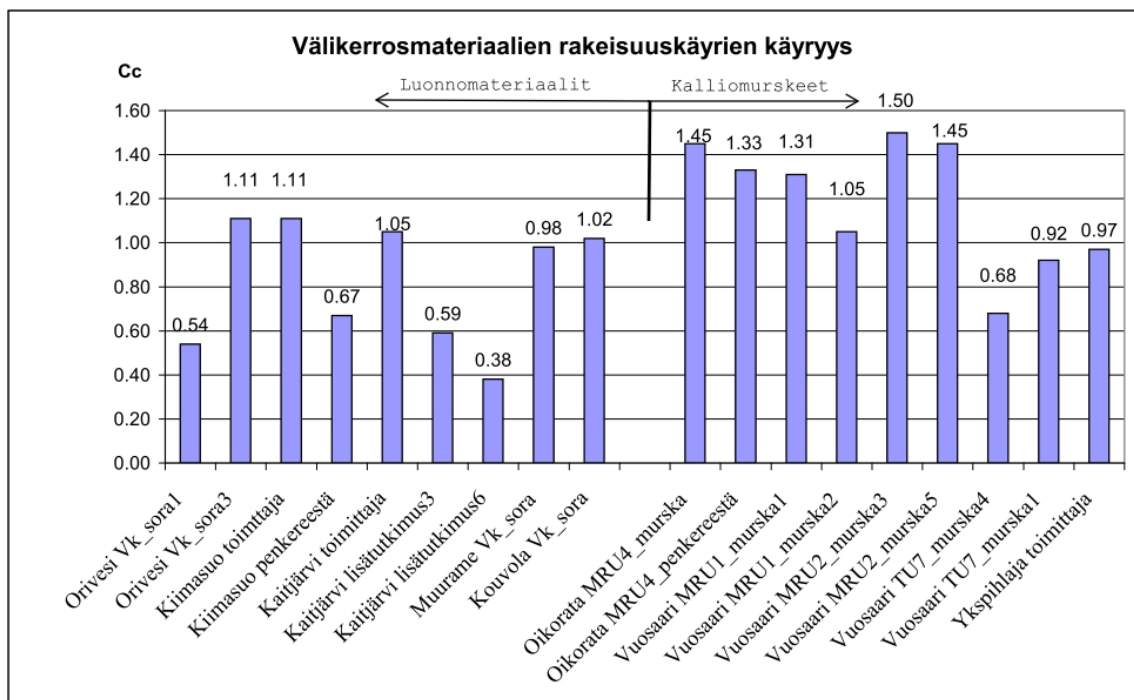


Kuva 54: Kohteiden kelpoisuuskirjoissa esitettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyristä määritetyt lajittuneisuutta kuvaavat C_U arvot

Oriveden sora1 ja sora3 ovat molemmat materiaalitoimittajan esittämiä rakeisuusmäärittelyksiä välikerrossoraksi esitetyistä materiaaleista. Näiden rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 31 käyrinä 1 ja 3. Kiimasuo toimittaja -materiaali on materiaalitoimittajan esittämä rakeisuus välikerrossorasta ja Kiimasuo penkereestä -arvo on valmiista raken-

teesta otetusta näytteestä määritetty rakeisuus. Näiden näytteiden rakeisuudet on esitetty kuvassa 34 käyrinä 1 ja 3. Kaitjärven materiaaleista toimittaja -materiaali on materiaali-toimittajan esittämän käyrän arvoja ja lisätutkimus 3 ja 6 ovat ulkopuolisen tahon tekemien lisätutkimusten kahden erillisen paalukohtaisen rakeisuusmäärittelyn tuloksia. Nämä rakeisuuskäyrät on esitetty Kaitjärven kohteen esittelyssä luvussa 5.4.3. näytteinä 3 ja 6. Muuramen ja Kouvolan vk_sora -materiaalit ovat materiaalitoimittajien esittämiä rakeisuuskäyriä välikerrosmateriaaleista. Näissä kaikissa edellä mainituissa kohteissa on käytetty alusrakenteessa luonnonmateriaaleja.

Seuraavana esitetyissä kohteissa alusrakennemateriaalina on käytetty kalliomursketta. Oikoradan kohteista vain MRU 4:stä oli rakeisuusmäärittelykset vielä saatavissa. Murska -nimellä on esitetty koko murskauksen aikainen keskiarvokäyrä ja penkereestä -nimellä on MRU 4:ssä otettujen paalukohtaisten näytteiden keskiarvokäyrä. Vuosaaren kaikissa kohteissa, MRU 1, MRU 2 ja TU 7, on esitetty tavaratoimittajan murskauksen aikaisen laadunvalvonnan kahden rakeisuudeltaan mahdollisimman poikkeavan näytteen arvoja. Näiden rakeisuuskäyrät on esitetty kappaleessa 5.8.3. Ykspihlajasta on esitetty vain toisen kelpoisuuskirjoissa esitetyn materiaalitoimittajan esittämän rakeisuuskäyrän arvoja.



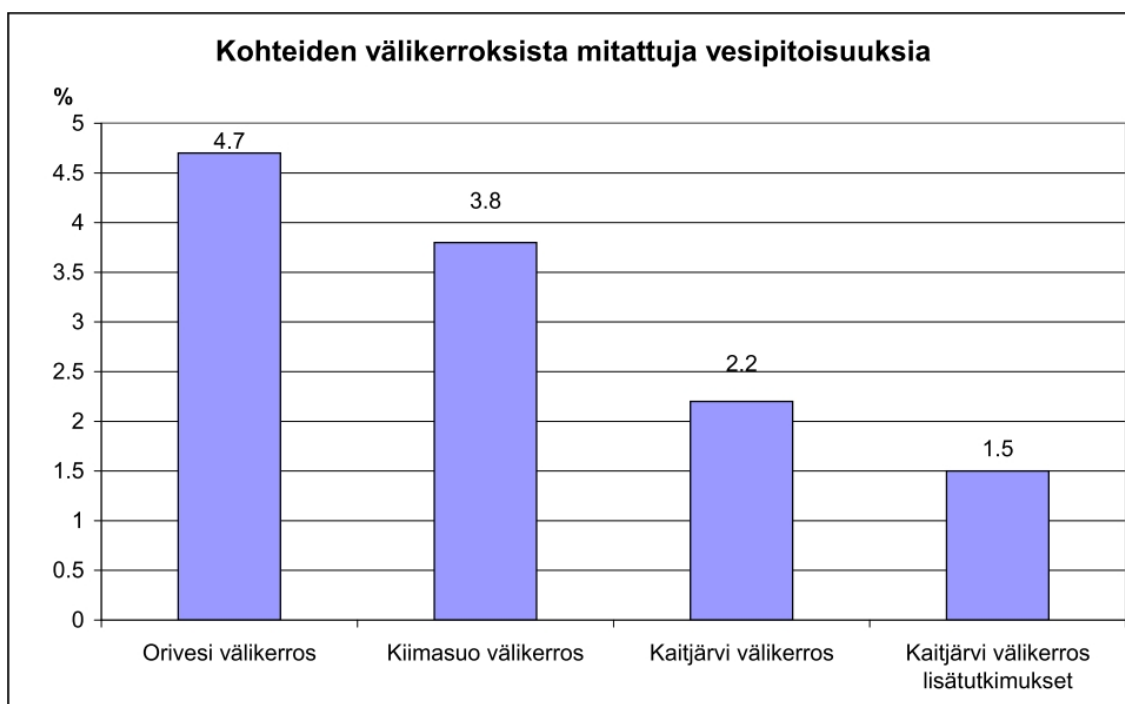
Kuva 55: Kohteiden kelpoisuuskirjoissa esitettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyristä määritetyt rakeisuuskäyrien käyryyttä kuvaavat Cc-arvot

Kaikissa tässä työssä tarkasteltavien kohteiden kelpoisuuskirjoissa esitettyjen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät sijoittuivat ohjealueiden sisälle. Tämä onkin ensisijaisen tärkeää arvioitaessa alusrakenteelle asetettujen toiminnallisten vaatimusten täyttymismahdollisuuksia koko sille asetetun 100 vuoden käyttöikävaatimuksen aikana. Kohteissa, joissa oli otettu näytteitä myös valmiista rakenteesta, oli sel-

västi havaittavissa muutoksia materiaalien rakeisuuksissa. Vaikka valmiista rakenteesta otettu näyte ei kokonaisuudessaan sijoittuisikaan ohjealueiden sisään, ei rakennetta tulisi heti hylätä, mikäli tiiviys- tai kantavuusvaatimukset muuten täyttyisivät. Tällöin tulisi arvioida materiaalin rakeisuuden muuttumisen vaikutusta koko rakenteen toiminnallisuusvaatimusten täyttymiseen, etenkin materiaalin routivuuden kannalta.

6.4. Vesipitoisuus

Tässä työssä tarkastelluissa kohteissa alusrakenteiden vesipitoisuuksia oli kelpoisuuskirjojen perusteella määritetty vain kohteissa, joiden tiiviyksiä oli mitattu säteilymittauslaitteella (Troxler) tai vesivolymetrillä. Vesipitoisuusmääritykset tehdäänkin käytännössä aina tiiviysmääritysten yhteydessä. Rakenteen vesipitoisuus on aina jonkin verran riippuvainen vallitsevista sää- ja maaperäolosuhteista. Rakenteen rakentamisen ja mittaushetken välillä saattaa olla pidempikin aikaväli, joten mittaushetken vesipitoisuus ei anna tarkkaa tulosta tiivistystyön aikaisesta vesipitoisuudesta, jolloin näiden tulosten käyttö tiivistystä arvioitaessa voi vääristää tuloksia. Kuvassa 56 esitetyt kohteissa mittaushetkillä vallinneet rakenteiden välikerrosten vesipitoisuuksien keskiarvot ovat kaikki materiaalien optimivesipitoisuuksia alhaisempia. Tarkasteltavissa kohteissa välikerrosmateriaaleina käytettyjen soralajikkeiden optimivesipitoisuudet vaihtelevat Hartikaisen (2002) mukaan 5-10 % välissä, materiaalin rakeisuudesta ja rakeisuuskäyrän muodosta riippuen.



Kuva 56: Valmiista rakenteista mitattujen vesipitoisuuksien keskiarvot kohteista joissa vesipitoisuudet oli määritetty

Edellä esitetyt vesipitoisuudet osoittavat sen, että harvoin käsiteltyjen, kuljetettujen ja uudelleen tiivistettyjen materiaalien vesipitoisuudet ovat luonnontilaisten materiaalien vesipitoisuuksissa. Jotta tiivistystyön aikana päästäisiin lähelle materiaalin optimaaliseen vesipitoisuuteen, on tiivistettävää rakennetta lähes aina kasteltava.

Etenkin kalliomurskemateriaaleilla tehtävien rakenteiden tiivistystyössä kerrosten kasteleminen ennen tärytiivistystä on erittäin tärkeää riittävän tiiviyn aikaansaamiseksi. Kastelun merkitystä kalliomurskemateriaalin tiivistymiseen tutkittiin Seinäjoki-Ruha- välillä tehdyssä koepenkeressä syksyllä 2009. Tutkimuksen alustavien tulosten perusteella rakenteen päältä tehtyjen levykuormitustulosten arvot paranivat huomattavasti sen jälkeen kun jo tiivistettyä rakennetta kasteltiin runsaasti ja tiivistettiin lisää täryjyrällä. Tutkimuksen lopullista raporttia ei ollut vielä julkaistu tämän diplomityön valmistuessa.

6.5. Itsemittaava jyrä

Itsemittaavan jyrän tulosaaineistoa oli käytettävissä ainoastaan yhdestä tässä työssä tarkastelluista kohteista, Oikoradan Maanrakennusurakka 4:stä. Jyrän tiiviysmittausten tulosaaineistoa oli hyvin kattavasti, käytännössä lähes koko urakka-alueelta. Tyypillisesti yhtä tiivistystyöaluetta käsittelevässä tulosteessa oli tulokset 120 m matkalta ja kokopenkereen leveys oli jaettuna kahdeksaan kaistaan. Tulosteiden numeeriset arvot käsittelevät ainoastaan koko tiivistysaluetta tai yhtä kaistaa kerrallaan. Jotta pystyttiin vertaamaan itsemittaavan jyrän antamia tiiviystuloksia perinteisemmällä menetelmällä tehtyihin, jouduttiin tiivistettävän rakenteen CMV-arvot määrittämään tiivistystulosten graafisesta tulosaaineistosta kohdilta, joista oli tehty myös perinteiset kantavuusmittaukset levykuormituskokein.

Itsemittaavan jyrän tiiviystuloksia verrattiin levykuormituskokeilla tehtyihin kantavuusmittauskokeiden tuloksiin. Taulukossa 40 on esitetty minkälaisen kuvan itsemittaavan jyrän tiiviystulokset ja levykuormituskokeiden tulokset antoivat rakenteen tiiviystilasta suhteessa toisiinsa. Levykuormitustulosten E_2 arvot ja E_2/E_1 suhdeluvut sekä itsemittaavan jyrän CMV arvot jaoteltiin kolmeen kategoriaan, hyvä, kelvollinen ja heikko. Jaottelussa käytettiin seuraavanlaista taulukossa 39 esitettyä jaottelua, jossa on lisäksi esitetty raja-arvojen sisälle osuvien tulosten lukumäärät.

Taulukko 39: Itsemittaavan jyrän tiiviystulosten ja levykuormituskokeiden vertailussa käytetty arvoluokittelu

	Hyvä		Kelvollinen		Heikko	
E2	>160	40kpl	150–160	2kpl	<150	4kpl
E2/E1	<1.8	39kpl	1.8–2.2	5kpl	>2.2	2kpl
CMV	≥40	33kpl	30–40	12kpl	<30	1kpl

Edellä esitettyyn luokittelujakoon levykuormituskokeiden E_2 -tulosten osalta päädyttiin Kerava-Lahti oikoradalle projektikohtaisesti sallitun E_2 keskiarvon 160 MPa ja Inf-

raRYL:n mukaisen yksittäistuloksille sallitun 150 MPa perusteella. Levykuormituskokeen E_2/E_1 suhteen luokittelussa rajat määritettiin siten, että hyvä tiiviysarvo täyttää selvästi InfraRYL vaatimuksen $E_2/E_1 < 2,0$ ja kelvollinen alue määritettiin tämän vaatimusarvon molemmille puolille. Itsemittaavan jyrän CMV arvojen luokittelun määrittämisessä käytettiin, jyrän kalibrointitietojen puuttuessa, itse jyräystuloksia. Tiivistystulosten perusteella arvioitiin, että rakenteen hyväksymisrajana on ollut CMV arvo 30, sillä yli 90 % (vertaa taulukko 28 kappaleessa 5.7.3.) tiivistettävästä pinta-alasta täytti tämän vaatimuksen ja kerralla tiivistettävien alueiden keskiarvotuloksista vain yhdessä jäätettiin tämän alle. Hyvä itsemittavan jyrän tiivistystulos on valittu selvästi tämän oletetun hyväksymisrajan yläpuolelle ja heikko tiiviys edellä mainitusta rajasta alaspäin. Itsemittaavan jyrän paalukohtaiset tiivistystulokset on jouduttu arvioimaan jyrän tiivistystulosten graafisesta näytöstä, johon sisältyy aina jonkin verran tulkitsijasta riippuvaa epävarmuutta.

Taulukko 40: Itsemittaavan jyrän tulosaineiston vertailua levykuormituskokeilla mitattuihin arvoihin

	Tulosten lkm	% mittaus- pisteistä
Jyrätulos sama E_2 :n kanssa	32	69.6 %
Jyrätulos parempi kuin E_2	5	10.9 %
Jyrätulos huonompi kuin E_2	9	19.6 %
	46	100.0 %
Jyrätulos sama E_2/E_1 :n kanssa	29	63.0 %
Jyrätulos parempi kuin E_2/E_1	6	13.0 %
Jyrätulos huonompi kuin E_2/E_1	11	23.9 %
	46	100.0 %

Taulukossa 40 on esitetty tulokset kun itsemittaavan jyrän kategorioituja tiivistystuloksia on verrattu levykuormituskokeiden kategorioituihin tuloksiin. Riveillä jyrätulos sama E_2 :n tai E_2/E_1 :n kanssa on ilmoitettu niiden mittaustulosten määrä, joissa jyrätuloksen ja levykuormitustulosten kategoriat ovat olleet samoja, esimerkiksi jyrän tiiviys ja levykuormituksen E_2 arvo ovat olleet molemmat hyviä, kelvollisia tai heikkoja. Jyrätulos parempi kuin E_2 tai E_2/E_1 on taas esitetty niiden mittaustulosten määrä, joissa jyrätuloksen kategoriat on ollut parempi kuin levykuormitustulosten kategoriat, esimerkiksi jyrätulos on ollut hyvä ja E_2 tulos ollut kelvollinen tai heikko. Jyrätulos huonompi kuin E_2 tai E_2/E_1 riveillä on niiden tulosten lukumäärä, joissa jyrätuloksen kategoriat on ollut huonompi kuin levykuormitustulosten kategoriat. Itsemittaavan jyrän tiiviysarvoja ja levykuormituskokeiden mittaustuloksia oli tehty samasta kohtaa 46 eri pisteessä. Taulukossa 40 on esitetty edellä mainittujen kategorioitujen tulosten prosenttiosuudet tästä 46 pisteen kokonaismäärästä.

6.6. Työmenetelmät

Tarkasteltujen kohteiden alusrakenteiden rakentamista, työ- ja tiivistysmenetelmiä sekä jyräyskalustoa selvitettiin kohteiden urakoitsijoilta. Taulukkoon 41 on koottu jokaisen kohteen tiedot kerralla rakennetun kerrospaksuuden, tiivistyksessä käytetyn jyrätyypin ja jyräysylityskertojen osalta. Lisäksi taulukossa on mainittu, onko kohteessa käytetty jyrä ollut tiiviyttä itsemittaavaa mallia tai onko tiivistystyön apuna käytetty kastelua.

Taulukko 41: Kohteiden rakennekerrosten tiivistystyöhön liittyviä tietoja

	Alusrakennemateriaali	Tiivistettävä krs paksuus, mm	Jyrätyyppi	Tiiviyso-mittari	Veden käyttö	Jyräyskerrat	Alusrakenteen paksuus, mm *
Orivesi	luonnonmateriaalit						1350 + 300
Kiimasuo	luonnonmateriaalit	700	13 t valssijyrä	kyllä	kyllä	tiiviyso-mittarin mukaan + materiaalia ajettiin autoilla penkan päältä	1650
Kaitjärvi	luonnonmateriaalit	-	13 t valssijyrä	kyllä	-	-	
Muurame	luonnonmateriaalit	n. 500	4,4 t kaksoisvalssi	ei	kyllä	määritetty ohjeen mukaan 5- 6 ylitystä	1450
Kouvola	luonnonmateriaalit	300 (vain välikerros)	4,4 t kaksoisvalssi	ei	kyllä	3-4 + materiaali ajettiin autoilla penkan päältä	300
Oikorata	kalliomurske	500	>8 t	joissain	joissain	4+2 tai 6+2	1750
Vuosaari MRU1	kalliomurske						
Vuosaari MRU2	kalliomurske	600-700	10-12 t valssijyrä	ei	kyllä	Ensimmäiset ylitykset ilman täryä, jyräyskerrat ohjeen mukaan (ei tiedossa)	1750
Vuosaari TU7	kalliomurske	300	täryjyrä	kyllä	ei	mittausten mukaan	1000
Ykspihlaja	kalliomurske	300–400	12 t valssijyrä	kyllä	kyllä	4	

* Alusrakenteen paksuus ilmoitettu eristyskerros + välikerros tai yhtenä lukuna, mikäli alusrakenne tehty yhdistettynä eristys- ja välikerroksena yhdestä materiaalista.

Edellä esitetystä taulukosta 41 käy hyvin ilmi, että yleisin kerralla rakennettava kerrospaksuus on tässä työssä tarkasteltavissa kohteissa ollut 500 mm. Nykykäytännön mukaan 500 mm kerrospaksuus onkin optimaalisin kerralla rakennettava kerrospaksuus riittävien työsaavutusten ja kuitenkin hyvän tiiviyyden aikaansaamiseksi. Jyrätyyppi ja painoluokat vaihtelevat jonkin verran käytetyn materiaalin mukaan. Kalliomurskemateriaalit vaativat riittävän tiiviystilan aikaansaamiseksi suuremman staattisen jyräkuorman kuin luonnonmateriaalit. Tässä työssä tarkastelluissa kalliomurskekohteissa ovat jyräpainot olleet pääasiassa yli 12 tonnia. Kerava-Lahti oikoradalta ei urakkakohtaisia tietoja tähän vertailuun saatu, mutta hankkeessa tehdyssä koetiivistyksessä oli käytetty 8 t jyrää, joka myös koetiivistyksen pohjalta tehtyyn tiivistystyöohjeeseen on kirjattu.

Kohteiden urakoitsijoilta saatujen tietojen perusteella tiivistettävän rakenteen kastelu vedellä tiivistyvyyden parantamiseksi on melko yleisesti käytetty menetelmä. Tämän tutkimuksen puitteissa kastelun vaikutuksesta rakenteen tiivistyvyyteen ja tiiviyys/kantavuustuloksiin ei ole kuitenkaan tarkoituksenmukaista ottaa kantaa tutkimusmenetelmätavasta aiheutuvista liian suurista epävarmuuksista johtuen. Kastelun vaikutusta tutkittiin syksyllä 2009 Seinäjoki-Ruha- välille rakennetun koepenkereen yhteydessä. Tutkimuksen lopullista raporttia ei ollut julkaistu ennen tämän diplomityön valmistumista.

Jyräyskertamäärät ovat edellä esitettyjen tietojen perusteella jokaisessa kohteessa hyvin samankaltaisia. Tyypillisesti kerralla tiivistettävää rakennetta on tiivistetty noin 4 täry-ylityskerran verran. Joissakin kohteissa, kuten Kiimasuolla ja Kouvolassa materiaalia ajettiin kuorma-autoilla rakennekerrokseen valmiin rakenteen päältä "uusien jälkien" periaatteella, eli materiaalia tuovat autot ajoivat penkan päällä aina eri kohtaa käyttäen, jotta ajamisesta aiheutuva rakenteen tiivistyminen jakautuisi tasaisesti koko alueelle. Oikoradalla tiivistystä tehtiin kahteen toisiaan kohtisuoraan suuntaan, joka tiivistyskokeiden perusteella edesauttoi rakenteen tiivistymistä (Suomalainen 2003). Taulukossa 40 Oikoradan kohdalla esiintyvät 4+2 ja 6+2 tiivistyskerrat tarkoittavat, että 4-6 ylityskertaa on tiivistetty radan suuntaisesti ja kaksi ylityskertaa radan poikittaissuunnassa.

6.7. Huomioita tutkimusmenetelmästä

Tutkimustietojen kerääminen rakennettujen kohteiden kelpoisuuskirjoista sisältää useita epävarmuustekijöitä niin tietojen todenmukaisuudesta kuin niiden oikeanlaisesta kohdistamisesta johtuen. Kyseisen menetelmän käyttö edellyttää useita tulosten yksinkertaistamisia ja oletuksia. Menetelmän käyttö todellisenä tutkimusmenetelmänä onkin hieman rajallinen juuri useiden muuttujien ja virhemahdollisuuksien takia.

Esimerkiksi kelpoisuuskirjoissa esitettyjen rakenteissa käytettyjen materiaalien raakeisuudet harvoin vastaavat penkereessä olevia materiaaleja. Etenkin kalliomurskeilla tapahtuu herkästi materiaalin lajittumista niin varastoinnin, rakentamisen kuin tiivistämisenkin yhteydessä. Oikorata hankkeessa, penkereestä otetuista näytteistä oli havaittavissa, että hienoaineksen määrä oli niissä vähäisempää kuin murskauksen aikana ote-

tuissa rakeisuusnäytteissä. Lisäksi yksittäisiä tiiviys- tai kantavuusmittauksia arvioitaessa on kyseisen mittauspisteen kohdalla olevan materiaalin rakeisuutta käytännössä mahdollon tietää ilman tutkimuspistekohtaisia näytteenottoja. Tästä johtuen rakenteiden tiiviyksien ja materiaalien vertailussa päädyttiin käyttämään mittausten keskiarvotuloksia. Keskiarvotuloksia käytettäessä tutkimuksella ei saada niin täsmällisiä tuloksia kuin, jos pystyttäisiin määrittämään jokaisen tiiviys- ja kantavuusmittaustuloksen kohdalla vallitseva rakenteen rakeisuus ja muut ominaisuudet. Virhettä syntyy etenkin niiden kohteiden osalta, joissa yksittäisten mittausten tulokset vaihtelevat suuresti.

Käytettäessä tutkimuksen lähtötietoina kelpoisuuskirjojen aineistoa, aiheutuu virhettä myös tiiviys- ja kantavuusmittaustavoista. Tällöin lähtötietoina on useamman eri urakan ja mittausrakojen tekemiä laadunvalvontamittauksia, jolloin mittaustavakin vaihtelevat varmasti jonkin verran, vaikka mittausten menetelmät ovat standardisoitu ja tarkkaan ohjeistettu. Esimerkiksi levykuormituskokeiden tuloksiin pystytään vaikuttamaan paikan valinnalla ja tasaushiekan käytöllä. Levykuormituskokeen tuloksiin vaikuttaa huomattavasti, mikäli kuormitettavalla kohdalla on esimerkiksi hieman suurempi kivi tai kalliomurskemateriaaleilla mitataan kohdasta jossa on hyvin vähän hienoaainesta. Lisäksi levykuormituskokeen tuloksista ilmoitettaviin E-moduuliarvoihin vaikuttaa jonkin verran millä laskukaavalla tai miltä kuormitusväliltä E-moduulit ja niiden väliset suhdeluvut määritetään. Tekemällä levykuormituskokeessa esimerkiksi kolme kuormitussykliä ja laskemalla kantavuussuhde kolmannella ja toisella kuormituksella saatujen muodonmuutosmoduulien suhteena E_3/E_2 , saadaan rakenteen tiiviystilasta huomattavasti parempi tulos kuin oikein määritettynä E_2/E_1 suhteella saataisiin.

Mitattaessa rakenteen tiiviyyttä säteilymittauslaitteella, mittaussyvyydellä on kohdullisen suuri vaikutus saataviin tiiviyksasteisiin. Kelpoisuuskirjoissa esitetyissä tuloksissa harvoin ilmoitetaan mittaussyvyyttä. Tällöin näiden tulosten käyttöön, tutkimuksellisessa tarkoituksessa, tulee suhtautua tietyllä varauksella kun lisäksi otetaan huomioon kohdassa 6.1. esitetty laajamittaisemman tiiviyksmittauksen yhteydessä tehtävät optimoinnit.

6.8. Tulosten vertailu

Rakenteen tiiviyyttä kuvaavien levykuormituskokeiden E_2/E_1 -suhteilla ja materiaalin rakeisuuskäyrän muodolla havaittiin kalliomurskerakenteiden osalta olevan yhteys. Kohdeissa, joissa kalliomurskeen rakeisuusjakaumaa kuvaava rakeisuuskäyrä oli hyvin roikkuva ja materiaalit tasarakeisempia, oli saatu parempia tiiviyksarvoja kuin kalliomurskeilla, jotka olivat hieman sekarakaisempia ja joiden rakeisuuskäyrät olivat loivempia. Roikkuvalla rakeisuuskäyrällä tarkoitetaan tässä sellaista rakeisuuskäyrää joka on hyvin pystysuora suurempien rakeiden alueella ja lähes vaakasuora pienempien raekokojen alueella. Huomionarvoista tässä on se, että alhaisempia tiiviyksarvoja saavutettujen kalliomurskeiden rakeisuuskäyrät sijoittuvat hyvin keskelle InfraRYL:ssä kalliomurskeille määritettyä rakeisuusohjealuetta ja ovat lähes täysin ohjealueen reunojen suuntaisia. Levykuormituskokeiden E_2 -arvoihin rakeisuudella ei ollut yhtä selvää vaikutusta.

Luonnonmateriaaleilla rakennetuissa kohteissa parhaita tuloksia tiiviys- ja kantavuusmittaustulosten perusteella saatiin materiaaleilla, joiden rakeisuuskäyrät olivat selvästi InfraRYL:in mukaisten materiaalien rakeisuusohjealueiden rajakäyrien suuntaisia. Materiaaleilla, joiden rakeisuuskäyrät poikkesivat ohjealueen rajakäyrien suunnasta, etenkin liian pystysuorat rakeisuuskäyrät, ei saavutettu riittäviä kantavuusarvoja tai niiden tiivistämisessä oli jopa ongelmia. Tällaiset liian pystyt tai luonnottomat muotoiset rakeisuuskäyrät sisältävät usein liian suuren määrän hiekka, jolloin välikerrosmateriaalille tarpeellisen soran ja kivien osuus jää liian vähäiseksi ja materiaalin kantavuusominaisuudet heikkenevät. Hyvin tasarakeinen materiaali ei myöskään tiivisty riittävän hyvin, sillä materiaalissa ei ole riittävästi erikokoisia maapartikkeleita täyttämään ja kii-laamaan muiden partikkeleiden välisiä tiloja.

Kerralla tiivistettävän kerroksen osalta 500 mm kerrospaksuus näyttäisi tutkimuksen perusteella olevan optimaalisin kerrospaksuus riittävän tiiviyn aikaansaamiseksi, heikentämättä kuitenkaan liikaa rakentamistehokkuutta. Työssä käsitellyistä kohteista ainakin kahdessa kerralla tiivistettävät kerrokset olivat mainittua 500 mm paksumpia. Kii-masuo- oikaisussa, 700 mm kerrospaksuuksilla, saavutettiin riittävät tiiviudet säteilymittauslaitteella mitattuna, mutta levykuormituskokein mitatut kantavuusarvot eivät E_2 arvojen osalta täyttäneet InfraRYL:ssä määritettyjä vaatimuksia. Tällaiset tulokset viittaisivat siihen, ettei rakennetta ole saatu riittävän tiiviiksi koko kerralla rakennetun kerroksen paksuudelta. Koska säteilymittauslaitteella pystytään rakenteen tiiviys määrittämään ainoastaan noin 300 mm syvyyteen saakka ja levykuormituslaitteen mittaustaikutus taas ulottuu huomattavasti syvemmälle, selittyy säteilymittauslaitteen ja levykuormituslaitteen poikkeavat mittaustulokset kerralla tiivistetyn kerroksen alaosan heikosta tiiviydestä. Myös toisessa paksuilla kerroksilla rakennetussa kohteessa, Vuosaaren MRU 2:ssa, sekä levykuormituskokeiden E_2 keskiarvotulos, että tiiviyttä kuvaava E_2/E_1 suhde jäivät alle vaatimusten.

Materiaalien rakeisuuksien kuvaamiseen käytettyjen C_U ja C_C -arvojen ja rakenteiden tiiviys- ja kantavuustulosten välille ei tämän tutkimuksen perusteella löytynyt selvää yhteyttä. Toisaalta materiaalikäyrissä oli kohteiden sisäisestikin suurta vaihtelua edellä mainituissa arvoissa, jolloin on mahdotonta kohdistaa rakeisuusarvoja tiettyihin tiiviys- ja kantavuusarvoihin. Kohteissa, joissa oli otettu paalukohtaisia näytteitä rakeisuuden määrittämiseksi, ei myöskään ollut havaittavissa yhteyttä rakeisuusarvojen ja tiiviys- ja kantavuustulosten välillä.

Tarkasteltaessa itsemittaavan jyrän käytettävyyttä ja luotettavuutta rakenteen tiiviyn arvioimiseen on ensisijaisesti kiinnitettävä huomiota taulukon 40 "jyrätulos sama" ja "jyrätulos huonompi kuin" levykuormituksella saatuihin arvoihin. Verrattaessa itsemittaavan jyrän tiiviystuloksia levykuormitustulosten E_2 ja E_2/E_1 -arvoihin, kattavat edellä mainitut kaksi tapausta lähes 90 % mittaustuloksista. Näin ollen itsemittaavalla jyrällä saadut tiiviudet ovat näyttäneet vain reilussa 10 %:ssä tuloksista parempia arvoja kuin levykuormituksilla saadut arvot. Juuri näiden tulosten kaltaiset kohdat voisivat tuottaa ongelmia, mikäli rakenteen tiiviyttä arvioitaisiin pelkästään itsemittaavien jyrrien tiivistystulosten perusteella.

Laadunvalvontamittauspisteiden tiheydessä oli havaittavissa jonkin verran vaihtelua eri kohteiden välillä ja harvassa kohteessa mittauksia oli tehty InfraRYL:in vaatimusten mukaisessa tiheydessä. Itsemittaavan jyrän käytöstä saatavaa lievennystä perinteisemmillä mittausmenetelmillä tehtävien laadunvalvontamittausten määrään, ei juuri ollut hyödynnetty ainakaan täysimääräisesti kohteissa joissa itsemittaavaa jyrää oli käytetty.

7. PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ratarakenteissa käytettävien materiaalien rakeisuuden ja tiivistysmenetelmien vaikutusta alusrakenteen päältä saataviin kantavuuksiin. Tutkimuksessa selvitettiin myös materiaalin rakeisuuden vaikutusta tiivistettävyyteen ja rakenteen tiiviyyteen sekä sen mahdollista yhteyttä kantavuusarvoihin.

Kelpoisuuskirjojen läpikäynti ja niistä saatujen tulosten tarkempi tarkastelu osoitti, että kelpoisuuskirjoissa esitetyissä aineistoissa oli hyvinkin paljon vaihtelua etenkin alusrakenteen kantavuus- ja tiiviydsmittausten osalta. Koska kelpoisuuskirjojen sisällössä ja esitettyjen asioiden laadussa ja täsmällisyydessä oli vaihtelua, jouduttiin joidenkin kohteiden tulosten käyttökelpoisuutta arvioimaan tarkoin. Epätyydyttävien rakenteiden syiden selvittämisessä jälkikäteen olisi rakenteissa käytettyjen materiaalien osalta suurta hyötyä, mikäli rakenteeseen tuodusta maa-aineksesta otettaisiin rakeisuusnäytteet tietyin välimatkoin ennen rakenteen tiivistämistä. Näiden rakeisuusnäytteiden osalta pystyttäisiin samalla valvomaan käytettävän materiaalin kelpoisuutta.

Rakenteen tiiviyksvaatimusten täyttymisen osalta pitäisi entistä enemmän pyrkiä saamaan kokonaisvaltainen varmuus rakenteen tiiviydestä yksittäisten pistemäisten otantojen sijaan. Nykyään tähän suositellaan itsemittaavaa jyrää, mutta vaihtoehtoisena menetelmänä voisi olla tiivistyskalustoihin asennettava paikkatietojärjestelmä, jonka avulla pystyttäisiin todentamaan tiivistyskaluston kulkema reitti ja ylityskerrat koko rakenteen alueella. Tällä menetelmällä olisi mahdollista todentaa rakenteen tiettyyn tiiviyteen tarvittavien jyräyskertojen toteutuminen. Tarvittavat jyräysylityskerrat määritettäisiin etukäteen koetiiivistyksellä. Tällaiset menetelmät eivät saisi kuitenkaan olla ainoa laadunvarmistusmenetelmä, vaan niiden lisäksi tulisi tehdä myös perinteisempiä kantavuus- ja tiiviydsmittauksia. Perinteisiä kantavuus- ja tiiviydsmittauksia olisi kuitenkin mahdollisuus tehdä nykyistä harvemmin. Tällöin rakentamistöiden eteneminen olisi todennäköisesti jouhevampaa, kun nykyisellään melko tiheästi tehtävät laadunvalvontamittaukset eivät häiritsisi rakentamistyötä niin paljoa kuin nykyään.

Luonnonmateriaaleilla rakennetuissa radan alusrakenteissa parhaat kantavuustulokset on saatu kohteissa, joissa käytettyjen välikerrosmateriaalien rakeisuuskäyrät ovat InfraRYL:ssä esitetyn välikerrosmateriaalin ohjerakeisuusalueen rajakäyrien suuntaisia. Tällaiset, muodoltaan loivasti nousevat käyrät, ovat riittävän sekarakeisia ja koostuvat siten sopivassa suhteessa erikokoisista maarakeista. Jo 1960 -luvulla määritetyt välikerroksen luonnonmateriaalien rakeisuuskäyrät on varmastikin määritelty juuri siten, että välikerrokseen soveltuvan materiaalin rakeisuuskäyrän tulee sijoittua ohjealueen sisään ja olla sen reunakäyrien suuntainen. Käyttökelpoisten luonnonmateriaalien vähentyessä

ja esiintymien sijoittuessa yhä etäämmälle rakennuskohteista, välikerrosmateriaaleina on havaittu käytettävän yhä enemmän maa-aineksia, joiden rakeisuuskäyrät vain jollain tavoin sijoittuvat ohjealueen sisälle. Koska luonnonmukaisille välikerrosmateriaaleille ei ole rakeisuusjakauman lisäksi asetettu muita rakeisuusvaatimuksia, kuten lajittuneisuus, ei tällaisten materiaalien käyttöä laatuvaatimusten perusteella ole estettykään. Nykyisten rakeisuusohjealueiden puitteissa, välikerrokseen soveltuu runsaasti myös sellaisia materiaaleja, joilla on erittäin vaikea tai jopa mahdoton saavuttaa ratarakenteilta vaadittavia tiukkoja tiiviys- ja kantavuusvaatimuksia.

Käyttökelpoisten luonnonmateriaalien vähentyessä, on radan alusrakenteissa ruvettu entistä enemmän käyttämään murskattua kiviainesta. Koko ratapenkereen rakentamisesta kalliomurskeesta on vielä melko vähän kokemuksia, etenkin murskatun kiviaineksen pitkäaikaisesta käyttäytymisestä ratapenkereessä. Tämänkin tutkimuksen perusteella nykyisten vaatimusten mukaisilla eristys- ja välikerroksen kalliomurskemateriaaleilla saavutetaan suhteellisen helposti välikerroksen päältä vaaditut kantavuuden E_2 - arvot. Kantavuusmittauksissa rakenteen tiiviyttä paremmin kuvaavalle E_2/E_1 suhteelle asetetut vaatimukset ovat huomattavasti hankalammin saavutettavissa. Nykyisin eristys- ja välikerroksessa käytettävissä kalliomurskemateriaaleissa hienoaineksen määrä on melko vähäinen verrattaessa esimerkiksi Ruotsissa vastaavissa kerroksissa käytettyihin kalliomurskeisiin. InfraRYL 2006:n päivitysversion 2009/1 alle 2 mm raekoon ainesta sallitaankin aikaisempaa enemmän. Hienoainespitoisuutta entisestään lisäämällä materiaalin tiivistymisominaisuudet paranisivat. Materiaalin tulee kuitenkin täyttää myös muita vaatimuksia, kuten routimattomuus, jolloin materiaalien laatuvaatimusten määrittäminen on optimointia eri ominaisuuksien kesken. Tutkimuksen perusteella parempia tiiviysarvoja saavutettiin kuitenkin kohteissa, joissa käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät olivat hyvin roikkuvia, eli niissä oli vähemmän hienoainesta. Tämä nykykäytännöstä poikkeava tulos selittyy todennäköisesti kohteiden erilaisilla tiivistystyömenetelmillä. Tällöin Kerava-Lahti-Oikoradalla perinteisen radan suuntaisen tiivistämisen lisäksi käytetty rataa vastaan kohtisuoran tiivistyssuunnan käytöllä voidaan olettaa olevan selvä parantava vaikutus materiaalin tiivistymiseen. Tällaisen tiivistysmenetelmän käyttö perinteisellä yksiraiteisella ratapenkereellä on kuitenkin lähes mahdotonta kapean pengerveyden takia.

Tiivistyskalustolla ei tämän tutkimuksen perusteella havaittu olevan oleellista vaikutusta materiaalien tiivistyvyyteen, mikäli kerralla rakennettava ja tiivistettävä kerrospaksuus oli suhteutettu oikein tiivistyskaluston massaansa nähden. Rakenteen kastelu tiivistystyön parantamiseksi näyttäisi tämän tutkimuksen perusteella olevan hyvin yleistä ratarakentamisessa. Tämän tutkimuksen perusteella on kuitenkin mahdoton arvioida kastelun todellista vaikutusta luonnon- tai kalliomurskemateriaalien tiivistyvyyteen, osittain tutkimusmenetelmästä johtuen. Seinäjoki-Ruha- välille tehdyn koepenkereen alustavien tutkimustulosten perusteella rakenteen runsaalla kastelemisella tiivistyksen aikana on kuitenkin selvää parantavaa vaikutusta kerroksen tiivistyvyyteen ja valmiin kerroksen päältä levykuormituksella mitattuihin muodonmuutosmoduuleihin.

Lajittuminen vaikeuttaa huomattavasti materiaalien maksimaalisten tiiviys- ja kantavuusarvojen saavuttamista. Kalliomurskemateriaalit ovat luonnonmateriaaleja huomattavasti herkempiä lajittumaan ja lajittumista tapahtuukin jokaisessa työvaiheessa aina jonkin verran. Tässäkin tutkimuksessa havaittiin selvää kalliomurskemateriaalien lajittumista kohteissa, joissa sitä pystyttiin arvioimaan murskauksen aikaisia ja valmiista penkereestä otettuja rakeisuusnäytteitä vertaamalla. Lajittumisen estämiseksi tulisi entistä enemmän kiinnittää huomiota penkereen rakentamis- ja tiivistystekniikoihin ja etenkin materiaalin varastoimiseen varastokasoilla.

Itsemittaavan jyrän tiivistystulosten tarkkuudesta ja samankaltaisuudesta levykuorituskokeilla saatuihin tiiviysarvoihin verrattuna saatiin tämän tutkimuksen osalta hyviä tuloksia. Itsemittaavien jyrrien ja etenkin dokumentoitujen sellaisten käyttöä tulisi lisätä työmailla. Suuremmissa hankkeissa ja urakoissa itsemittaavan jyrän käytöllä voisi olla mahdollista saavuttaa huomattaviakin säästöjä rakentamisen sujuvoitumisen ansiosta kun rakenteiden tiiviyttä pystytään arvioimaan lähes reaaliaikaisesti. Itsemittaavan jyrän tiivistystulosten avulla pystytään myös todentamaan rakenteen tiiviys koko penkereen alueelta ja ohjaamaan perinteisemmällä laadunvalvontamittausmenetelmillä suoritettavat mittaukset oikeisiin kohtiin laadun varmistamiseksi. Näin on saavutettavissa tiiviydeltään homogeenisempia ja paremman kestävyyskautta kokonaistaloudellisia rakenteita.

Tutkimukseen valikoituneista kohteista saatujen tulosten perusteella sekä suorilla tiiviyden että kantavuuden mittausmenetelmillä saadaan samansuuntaisia tuloksia rakenteen tiiviydestä. Suoranaista rakenteen tiiviysastetta ei kantavuusmittauskokeilla pystytä tämän tutkimuksen perusteella kuitenkaan määrittämään, koska vähäisen otannan takia jokaisella yksittäisellä tuloksella on liian suuri painoarvo, jotta selkeitä päätelmiä asiasta olisi mahdollista tehdä.

Infrarakentamisessa ja etenkin ratarakentamisessa tekniset ominaisuudet ja toteutustavat ovat hyvin tarkkaan määriteltäviä. Tiukat reunaehdot jättävät työn tekijöille hyvin vähän innovaatiomahdollisuuksia, mikä osaltaan on omiaan hidastamaan uusien parempien työmenetelmien kehittymistä. Toisaalta selkeiden ja tiukkojen reunaehtojen avulla saadaan radan alusrakenteista varmemmin tiukentuneet tasaisuus- ja vakavuusvaatimukset täyttäviä rakenteita sekä pystytään takaamaan rautateiden turvallisuus.

Työn perusteella saatiin hyvä kuva ratarakentamisessa käytetyistä työmenetelmistä. Saatujen tulosten pohjalta pystytään työmenetelmiä kehittämään tiivistyvyyden ja rakenteen lopullisen tiiviyden kannalta entistä parempaan suuntaan. Etenkin rakennepaksuuksissa ja tiivistysmenetelmissä havaittiin tämän työn perusteella parantamistarvetta. Alusrakenteissa käytettyjen materiaalien osalta havaittiin ongelmia ja epäkohtia niiden rakeisuuksissa. Tämän työn tulokset soveltuvat kuitenkin heikosti aineistoksi mietittäessä mahdollisia muutoksia radan alusrakenteiden materiaalivaatimuksiin. Työmenetelmien osalta työstä saadut tulokset ovat käyttökelpoisempia. Saatuja tuloksia voidaan käyttää jatkossa hyväksi esimerkiksi tiivistysohjeiden laadinnassa.

LÄHTEET

Ali-Runkka, T. 2010. Toimitusjohtaja, Geopalvelu Oy. Sähköpostiviesti 8.6.2010.

Bomag. 2006. Käyttö ja huolto-ohjeet BW 211 D-4.

Banverket. 2007. Järnvägs AMA 98, Anläggning, Version 2. 3 s. 22 bilaga.

Conplant Ammann Australia. 2006. [WWW]. [Viitattu 3.7.2010]. Saatavissa <http://www.conplant.com.au/>

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto Oy. 358s. + 7 liite s.

Floss, R., Gruber, N., Obermayer, J. 1983. A dynamical test methods for continous compaction control. Proceedings of the 8th European Conference on soil mechanics and Foundation engineering: Improving of ground. Volume 1: in situ testing, soil grouting, deep compaction, laboratory testing. P 25-30. Helsinki 23-26 May 1983. Rotterdam.

Gostroy of Russia. 1995. Construction Norms and Regulations of the Russian Federation, Railroads with 1,520-mm track (SNiP 32-02-95). Moskova. 21 s.

Gostroy of Russia. 1998. Set of rules on design and construction, Design of earthwork for railways with 1,520 mm track (SP 32-104-98). Moskova. 54 s. + liitteet

Göbel, C., Lieberenz, K., Richter, F. 1996. Der Eisenbahnunterbau. Deutsche Bahn Fachbuch No 8-20, Eisenbahn Fachverlag, Heidelberg-Mainz.

Hakulinen, M. 2009. Rakentamisen aiheuttamat tärinät -tutkimushanke, Taustaselvitykset. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 130s. saatavilla: <http://www.sgy.fi/web/page.aspx?pageid=72843>

Hartikainen, O-P. 2002. Maarakennustekniikka. Helsinki, Otatieto. 196s.

InfraRYL 2006, Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1 Väylät ja alueet. Hämeenlinna 2006, Rakennustietosäätiö RTS. 622s.

InfraRYL 2006 päivitystiedot 2009/1. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1 Väylät ja alueet. Päivitystiedot julkaistu 1.1.2009, päivitetty 16.2.2009. Verkkoersio. Saatavissa: http://www.rts.fi/infraryl/kayttoonottoa_helpottavia_tiedostoja.htm

Jernbaneverket. 2009. Underbygning, Banelegeme. 15s.

Jääskeläinen, R., Rantamäki, M., Tammirinne, M. 2009. Geotekniikka. Helsinki. Otatieto, Yliopistokustannus. 307s.

Kari, S. 2010. Projekti-insinööri, Lemminkäinen Infra Oy. Sähköpostikeskustelu 2.7.2010.

Keinonen, M. 2006. Oikoradan rakentamisessa upeata yhteistyötä. Oikorata-lehti, 1.9.2006, s. 4-5.

KH-Koneet Oy. Maanmuokkaus- ja kiinteistönhoitokoneiden maahantuoja. [WWW]. [Viitattu 2.7.2010]. Saatavissa <http://www.kh-koneet.fi/>

Kivi, J. 2010. Johtaja, Lemminkäinen Infra Oy, Väylärakentaminen. Puhelinkeskustelu 4.6.2010.

Kolisoja, P. 2009a. Tie-, katu- ja ratarakenteiden suunnittelu, Luento 3. Tie-, katu- ja ratarakenteisiin kohdistuva kuormitukset. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaisematon luentokalvosarja. 46 sivua.

Kolisoja, P. 2009b. Tie-, katu- ja ratarakenteiden suunnittelu, Luennot 5 ja 6, Väylärakenteiden sitomattomat materiaalit ja niiden mekaaninen käyttäytyminen. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaisematon luentokalvosarja. 77 sivua.

Kolisoja, P. 2009c. Tie-, katu- ja ratarakenteiden suunnittelu, Luento 9, Ratarakenteiden toiminta ja mitoitus. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Julkaisematon luentokalvosarja. 57 sivua.

Liikennevirasto. 2010a. Säännöllisen liikenteen aikataulut. [WWW]. [Viitattu 3.5.2010]. Saatavissa <http://gratu.miso.fi/aikataulut/>

Liikennevirasto. 2010b. Hankekuvaukset. [WWW]. [Viitattu 31.5.2010]. Saatavissa <http://www.rhk.fi>

Maanmittauslaitos. 2010. Karttapaikka. [WWW]. [Viitattu 3.6.2010]. Saatavissa <http://www.karttapaikka.fi>. Kopiointilupa nro 40/MML/10.

Ratahallintokeskus. 1999. Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL), Osa 5 Maaleikkaus- ja pengerrystyöt. Helsinki, Ratahallintokeskus. 68s.

Ratahallintokeskus. 2004. Päälysrakennetöiden yleinen työselitys. Helsinki, Ratahallintokeskus. 40s.

Ratahallintokeskus. 2008. Ratatekniset ohjeet, Osa 3, Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 50s. + liitteet 3

Ryynänen, T., Kotimäki, H., Belt, J. 1993. Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen. Esitutkimus. Oulu. Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. Tielaitoksen selvityksiä 34/1993. 71s. + liitteet 16s. ISBN 951-47-663-1, TIEL 3200159.

Ryynänen, T., Kotimäki, H., Belt, J. 1994. Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen. Loppuraportti. Oulu. Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. Tielaitoksen selvityksiä 53/1994. 63s. + liitteet 6s.

Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyys. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008. 75 sivua ja 5 liitettä.

SFS-Käsikirja 179-1. 2008. Geotekninen tutkimus ja koestus, Osa 1: Maan ja kallion luokitukset. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. 113 s.

Selig, E.T., Waters, J.M. 1994. Track Geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. 435s.

Suomalainen, J. 2003. Lahden oikorata, yhdistetyn väli- ja eristyskerroksen tiivistämiskokeet. Lausunto.

Tiehallinto. 2001. Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki, Tiehallinto. 61s. + liitteet 7.

Tiehallinto. 2005. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Helsinki, Tiehallinto, tie- ja geotekniikka. 13s.

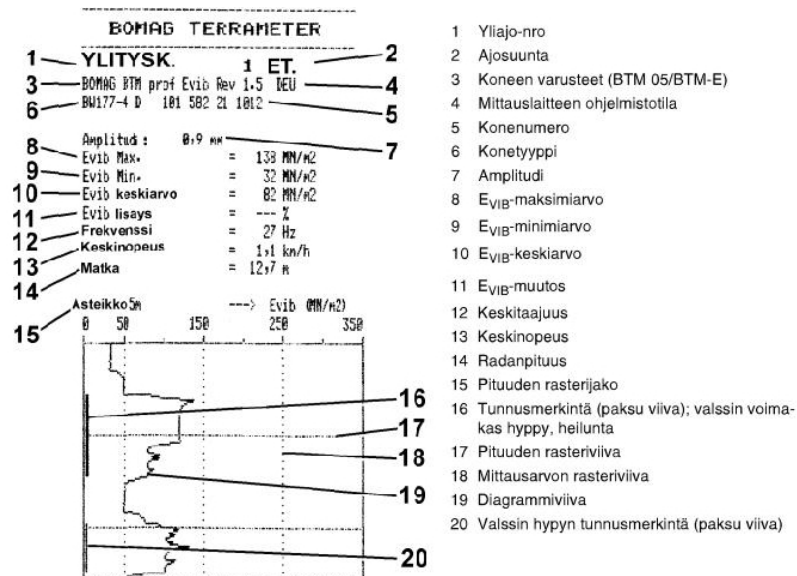
Tielaitos. 1990. Laadunvalvontaohjeet, Alusrakenne ja päälysrakenteen sitomattomat kerrokset. Helsinki, Tiehallitus vastuuyksikkö Tuotanto-osasto Geopalvelukeskus. 50s. +liitteet 74s.

Tielaitos. 1993. Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset Yleiset perusteet. Helsinki. Tielaitos, Kehittämiskeskus

Troxler Canada West Inc. 2010. [WWW]. [Viitattu 30.4.2010] Saatavissa <http://www.troxlerwest.ca>

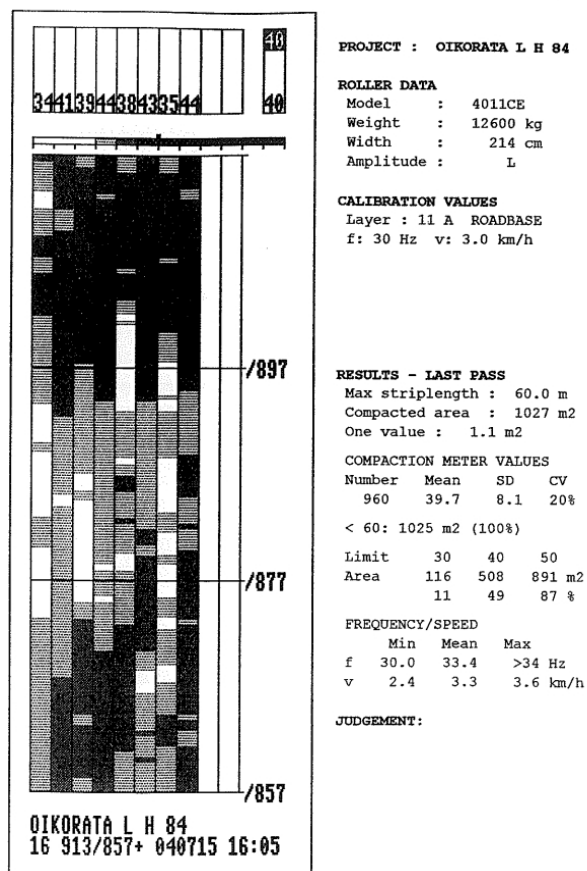
Uudenmaan Maarakentajien Konevälitys Oy. 2008. [WWW]. [Viitattu 15.3.2010]. Saatavissa <http://www.konevalitys.com/index.php/tiivistyskalusto.html>

LIITE 1: ITSEMITTAAVAN JYRÄN TIIVISTYSTU- LOKSEN TULOSTE-ESIMERKKEJÄ



Bomagin Terrameter tiiviysmittauslaitteen tuloste (Bomag 2006)

CDS-012J GEODYNAMIK AB
Compaction Documentation System 04-07-16 14:25



Geodynamik laitteen tiivistystuloste (Oikoradan kelpoisuuskirja)

LIITE 2: VOLYMETRIKOEEN SUORITUS

Irtotiheys määritetään kentällä kaivamalla tarkkailukohtaan kuoppa, jonka tilavuus mitataan volymetrillä. Kuoppaa kaivettaessa siitä saatu aines kerätään tarkoin talteen. Se kuivataan ja punnitaan. Irtotiheys lasketaan jakamalla kuivan aineksen massa kuopan tilavuudella.

Jos lisäksi halutaan määrittää aineksen vesipitoisuus, on kuopasta saatu aines punnittava myös märkänä. Tilavuuden mittaukseen voidaan käyttää vesi- tai hiekkavolymetriä. Ne eivät sovellu erittäin kivisten ja karkeitten maa-ainesten irtotiheysmäärittäykseen.

Tarvittavia laitteita ovat volymetri pohjalevyineen, välineet tarkkailukohdan tasausta ja kuopan kaivamista varten, kuten kauha tai lusikka, vasara ja taltta, teräviivain, kannellisia peltiastioita tai muovipusseja kaivetun aineksen säilytykseen, vaaka, kapasiteetti 15 kg ja tarkkuus 5 g, sekä laitteet vesipitoisuuden määrittystä varten

Suoritus

Tutkittava kohta tasataan poistamalla siitä tarvittaessa ainesta. Jos mittaus halutaan tehdä tutkittavan kerroksen sisäosista, on ensiksi kaivettava laajahko halutun syvyinen kuoppa, jonka pinta tasataan. Volymetrin pohjalevy asetetaan tasatulle alustalle. Eräissä malleissa pohjalevy voidaan kiinnittää alustaan nauloilla.

Jos käytetään vesivolymetriä, otetaan ensiksi mittauksen alkulukema. tätä ennen volymetri on täytettävä vedellä tai talvella pakkasnesteeellä ja suoritettava tarkistusmittaukset.

Myös on tarkistettava, ettei laitteessa esiinny vuotoja. Volymetrin pohja asetetaan pohjalevyssä olevaan syvennykseen ja volumetriin pumpataan ilmaa kunnes paine on noin 20 kN/m^2 ($\text{kPa}=0,2 \text{ kg/cm}^2$). Laitteissa on oltava manometri paineen mittausta varten.

Laitetta pidetään tukevasti paikallaan mittauksen aikana. Sylinterin asteikolta luetaan vesipinnan alin lukema, joka merkitään muistiin mittauksen alkulukemana.

Iimapumppu käännetään imuasentoon ja ilmaa poistetaan volymetristä, kunnes kumisukka on saatu uudelleen sylinteriin.

Tämän jälkeen kaivetaan pohjalevyn reiän läpi varovasti noin yhden litran suuruinen kuoppa. Kaivettaessa on pohjalevy pidettävä tukevasti paikallaan. Kuoppa on pyrittävä saamaan sylinterin muotoiseksi. Irrotettu aines on poistettava kokonaan kuopasta ja se on kerättävä tarkoin talteen muovipussiin tai kannelliseen astiaan.

Volymetri asetetaan uudelleen paikalleen pohjalevyn päälle. Siihen pumpataan ilmaa, kunne paine on noin 20 kN/m^2 . Sylinterin asteikolta havaitaan alin vedenpinnan lukema eli loppulukema. Tämän jälkeen pumppu käännetään ja kumisukka pumpataan takaisin sylinteriin.

Kuopan tilavuus lasketaan vähentämällä alkuluku loppulukemasta. Irtotiheys saadaan jakamalla kuopasta otetun aineksen kuivapaino edellä mainitulla tilavuudella. Tiivistämistarkkailussa voidaan käyttää lomaketta.

LIITE 2

Suomalaisessa vesivolymetrimallissa laitteeseen kuuluu erityinen kalibrintikuppi, jonka tilavuus tunnetaan. Laite kalibroidaan siten, että kumikalvo pumpataan kupin seinämiä vastan ja mitta-asteikko siirretään osoittamaan kupin tilavuutta.

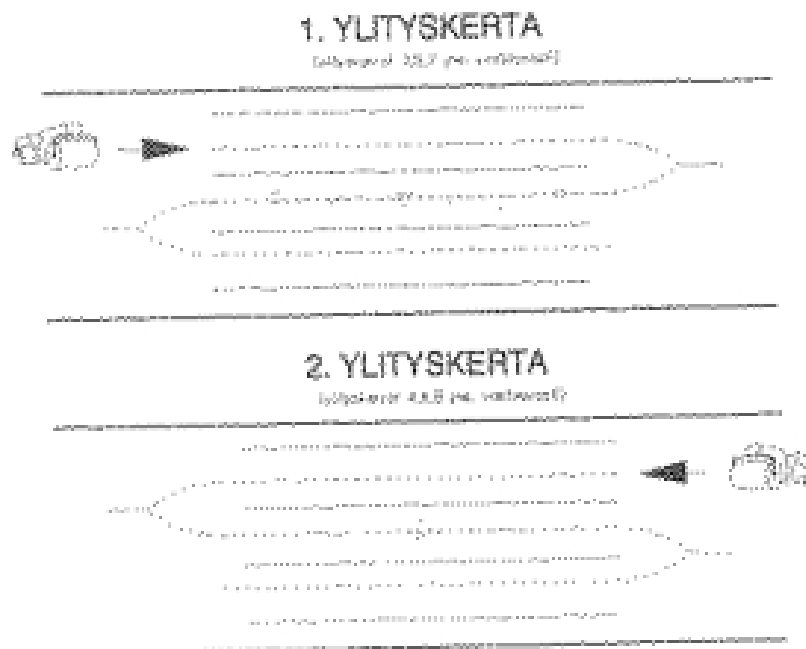
Edellä esitetyt määrittämissuhteet edellyttävät vesivolymetrin käyttöä. Hiekkavolumetriä käytettäessä laitteet ja kokeen kulku ovat edellä selostettuja vastaavat. Veden asemesta siinä käytetään tilavuusmittaukseen tasarakeista 0,5..2,0 mm kuivaa hiekkaa, joka sulomattomana asettuu aina samaan tilavuuteen. Kaivetun kuopan tilavuus saadaan kuoppaan valutetun hiekan tilavuudesta, joka luetaan laitteen mitta-asteikosta tai, joka laskeaan valutetun hiekan massan ja irtotiheyden avulla. Mittahiekka voidaan osaksi kerätä kuopasta talteen. (Tielaitos 1990)

LIITE 3: KOETIIVISTYKSEN TOTEUTUSSUUNNITELMAN PERIAATE

Tiivistettävät maalajit, pohja-, työskentelyolosuhteet eivät ole koskaan samoja eri paikoissa. Tämän takia laajan tiivistystyön alussa olisi syytä tehdä kenttätiivistyskokeita. Näin saadaan selville tarkoituksenmukainen kerrospaksuus, jyräysnopeus ja ylitysten lukumäärä.

Yleisiä ohjeita

1. Tutkittava kerros on levitettävä samasta materiaalista hyvin tiivistetyn kerroksen päälle. Alla olevan kerroksen tiheyden tulee olla vähintään yhtä suuri kuin uudelle kerrokselle on suunniteltu.
2. Koealue tiivistetään vähintään kolmena rinnakkaisena kaistana kuvan 1. mukaisesti. Kahden kaistan limittäisyys tulee olla 10 % valssin leveydestä. Kaikki kolme kaistaa tiivistetään yhtä monella jyrän ylityskerralla. Tiivistysmääritykset tehdään keskimmäisestä kaistasta. Tiivistetyn alueen ulkopuolella on oltava jyrän leveyden verran piennarta materiaalin vaakasiirtymisen estämiseksi.
3. Jyrän nopeus on määritettävä ennen koetta, ja sitä tulee tarkkailla jatkuvasti. Täryjyrälle sopiva nopeus maa- ja louhetäytteellä on 3-4 km/h.
4. Jyrättäessä tulee materiaalin kosteuspitoisuuden olla lähellä optimikosteutta ($\pm 2\%$). Yleensä on edullista, että kenttäkosteus on hieman optimikosteutta alhaisempi.



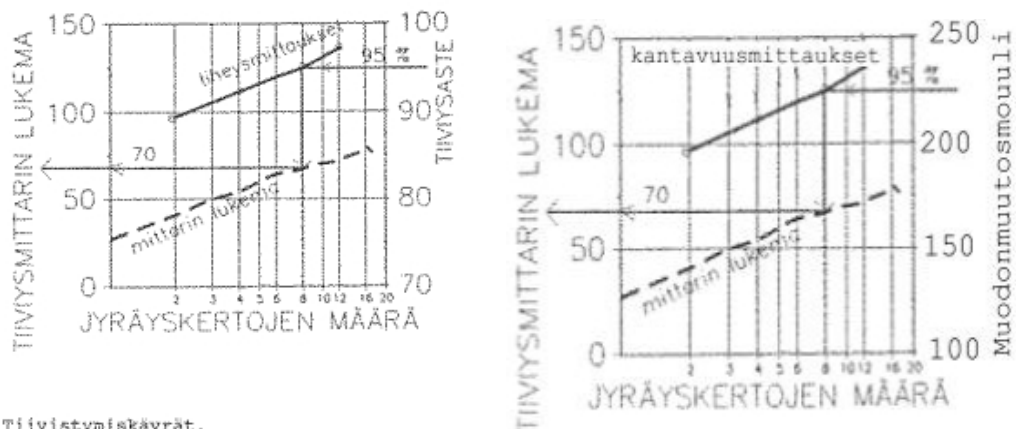
Kuva 1. Jyräysmalli koealueella.

Kenttätiivistyskokeen kulku

Jokaisella ylityskerralla mittalaitteen arvot rekisteröidään merkittyjen mittauspisteiden kohdilta. Keskiarvot lasketaan ylityskerroilta 2,4,6,8,10,12. Samojen ylityskertojen jälkeen tehdään tiivysmääritykset säteilymittauslaitteella ja/tai hiekka/vesivolymetrillä samojen mittauspisteiden kohdilta.

Kalliomurskeesta rakennetuissa kohteissa edellä esitetyt mittaukset tulee suorittaa myös kantavuusmittauskokein, joista myös muodostetaan seuraavana esitettävä tiivistymisdiagrammi.

Mikäli tiiviyden määrityslaitteita ei ole esim. pienellä työmaalla käytettävissä, voidaan koe tehdä siten, että kunkin jyrän ylityskerran jälkeen kirjataan jyrän tiivysmittarin lukema. Jyräystä jatketaan niin kauan, että mittarin lukema ei enää sanottavasti muutu. Kolmen viimeisen lukeman keskiarvoa käytetään ohjearvona varsinaisessa tiivistystyössä. Itsemittaavan jyrän tulokset tulisi kuitenkin aina varmistaa jollain perinteisemmällä tiivys- tai kantavuusmittausmenetelmällä. Tulokset esitetään graafisesti diagrammissa. Kuvan 2. diagrammissa ylityskerrat ovat puolilogarismissa asteikossa.



Kuva 2. Tiivistymiskäyrät.

Diagrammista voidaan lukea, että 95 % Proctor- tiivysvaatimus saavutetaan 8 ylityskerralla ja vastaavasti mittauslaitteen arvo 70 voidaan ottaa minimivaatimukseksi.

Erityisesti hienorakeisilla maalajeilla mittauslaitteen tulokset ovat suuresti riippuvaisia vesipitoisuudesta. Parhaiten mittalaite soveltuu sellaisten hienorakeisten maalajien laadunohjaukseen, joiden vesipitoisuus on suhteellisen alhainen ja vakio. Jos vesipitoisuus vaihtelee, on mittauslaite kalibroitava useilla eri vesipitoisuuksilla. Tällöin vesipitoisuutta on tarkkailtava tiivistämistyön aikana.

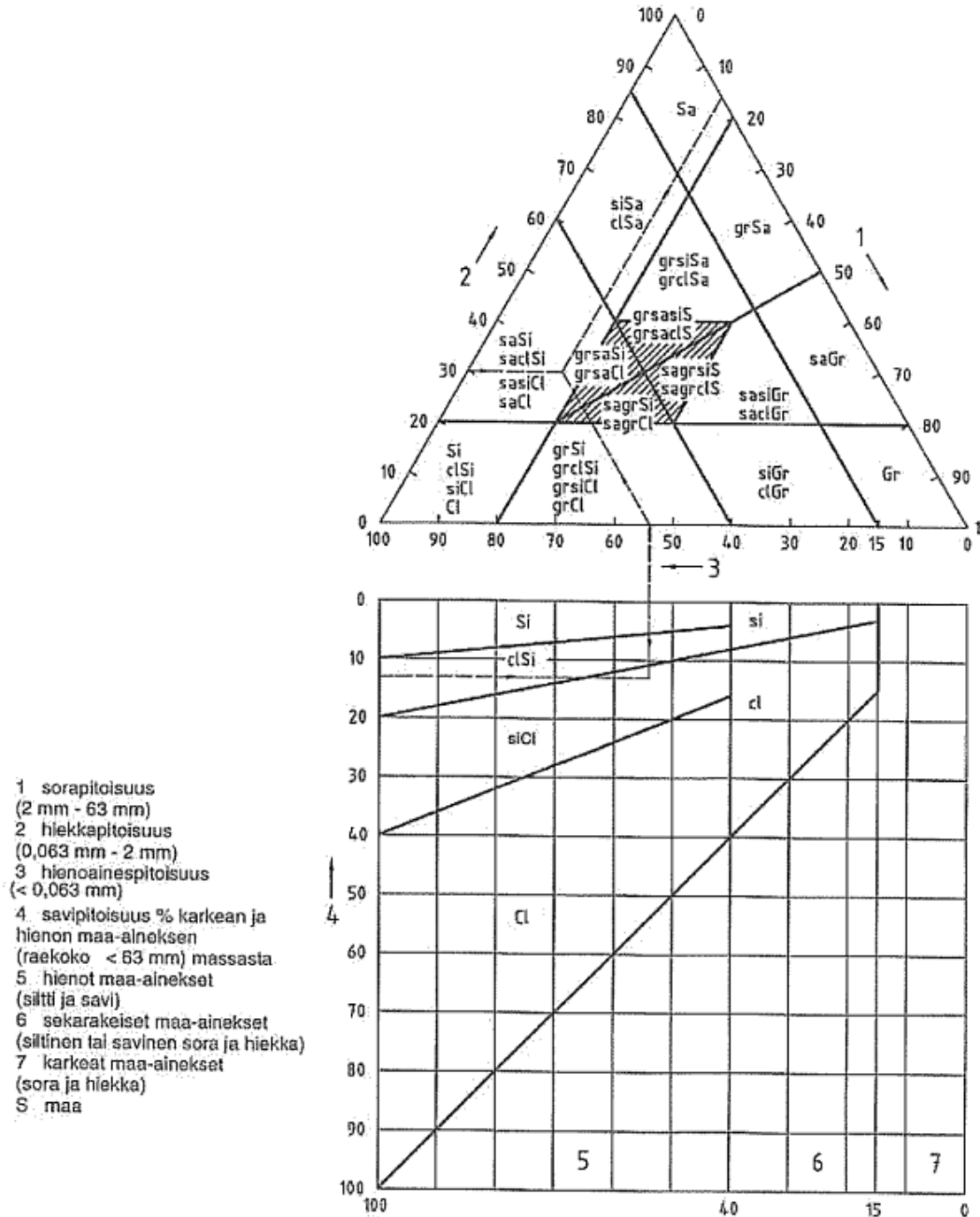
Hyvän tasalaatuisen tiiviyden saavuttaminen edellyttää, että jyrän kuljettaja opetetaan aktiivisesti seuraamaan mittarin lukemaa ja jyräystyötä. Kuljettajan tulee ilmoittaa välittömästi työnjohdolle, jos tyydyttävää tulosta ei saavuteta sovitulla ohjejyräyskermäärillä. Liikajyräystä ja kiviaineksen rikkoutumista on ehdottomasti vältettävä.

Mikäli jyrissä on kirjaava tiiviyden mittalaite, voidaan hyväksytyllä tasolla saavutettu tiivistystulos mitata ja saadut arvot säilyttää laadun arvostelutositteena muiden laadunvalvontatulosten yhteydessä väli- ja loppukatselmuksia sekä työn laadun loppura-

LIITE 3

portointia varten. (Tielaitos 1990) Itsemittaavan jyrän tiiviystulokset eivät kuitenkaan saa olla ainoa kelpoisuuskirjoissa esitettävä tiiviiden laadunvalvonta-aineisto vaan rakenteen tiiviyttä tulee mitata myös jollain niin sanotulla perinteisemmällä tiiviys- tai kantavuusmittauskokeella.

LIITE 4: EUROKOODIEN MUKAISEN MAALAJI- LUOKITUKSEN MÄÄRITYS RAKEISUUTEEN PE- RUSTUEN



(SFS käsikirja 179-1)

Gr=	Gravel=	Sora
Sa=	Sand=	Hiekka
Si=	Silt=	Siltti
Cl=	Clay=	Savi
S=	Soil=	Maa (käytännössä moreeni)